

高黃酸鹽 시멘트와 플라이애쉬를 사용한 高强度콘크리트의 力學的 特性에 關한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Mechanical Properties of High Sulphated Cement Concrete with Fly-Ash

임창덕

〈쌍용양회 조사 개발실/ 部長〉

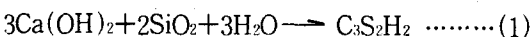
1. 서론

콘크리트의 고강도화는 부재단면이 감소하여 경제 적일뿐만 아니라 콘크리트 부재의 프리캐스트화가 용이하여 품질관리, 내진, 내구성면에서도 많은 장점이 입증됨에 따라 국내에서도 그에 대한 관심이 높아짐과 동시에 이의 실용화를 위한 많은 연구가 이루어지고 있지만 고강도 콘크리트의 품질에 대한 불확실성 및 내구성등에 대한 이해와 확신이 부족하고 고강도 콘크리트를 이용한 부재 설계 및 구조 해석시 국내 실정에 맞는 재료 모형 및 해석 이론의 개발이 미흡 등으로 인하여 고강도 콘크리트의 실용화는 아직 미흡한 것으로 평가된다.

본 연구는 800kg/cm² 이상의 고강도 콘크리트 제조가 가능한 국내 S사에서 개발한 고허산염시멘트를 이용하여 고강도 콘크리트 제조 가능성이 확인되었지만, 고유동화제 첨가로 인하여 작업성 유지시간이 짧아 현장에서의 제조시에 어려움이 예상되므로 작업성 개선 및 장기강도 향상을 목적으로 고허산염시멘트에 플라이애쉬 10%를 첨가하여 제조한 고강도콘크리트의 작업성 향상과 이에 따른 압축강도 증진 유무 및 내구특성을 실험적으로 검토하였다.

1.1. 研究內容 및 範圍

고강도콘크리트 제조에 관한 연구는 주로 고성능 감수제나 첨가재료인 실리카 흙, 미분말 고로슬래그, 플라이애쉬 등을 첨가하여 낮은 물시멘트비에서 수화시켜 미분말에 의한 충전효과(filler effect)로 공극이 감소되고 식(1)과 같은 포조란 반응이 장기간에 걸쳐 이루어져 압축강도가 증진된다.



그러나 이와같은 미분말 혼화재료에 의한 실용화는 아직까지 실험적 단계이거나 기초 및 이론연구에 머무르고 있고 건축 구조물에서의 구체적 실적은 최근에 이루어지고 있는 실정이다. 특히 토목용 콘크리트 제품과 같이 된배합의 콘크리트를 증기양생 시킨 토목용 콘크리트 제품에서는 미립분말에 의한 작업성 저하로 이를 보완기 위해 과량의 고유동화제가 사용되어야 한다.

그러나 고유동화제는 된배합 콘크리트에서 Slump loss가 크기 때문에 이를 개선하기 위하여 현재까지 알려진 플라이애쉬의 적정 첨가량 선정을 시멘트 중량의 10%로 결정하였고 이를 시멘트에 대체 사용하였다.

따라서 플라이애쉬를 고허산염시멘트에 10% 첨가함으로써 고강도콘크리트의 작업성 및 강도에 미치는 영향과 동결융해저항성, 건조수축, 화학저항성, 중성화등 내구특성을 검토하여 고강도 콘크리트의 제조가능성을 연구범위로 하였다.

2. 실험방법

2.1. 사용재료

(1) 시멘트

고황산염시멘트와 비교용으로 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 이들 화학적·물리적 성질은 Table 1, 2와 같다.

(2) 플라이애쉬

고황산염시멘트에 10% 대체하여 사용한 플라이애쉬는 국내 보령 화력발전소에서 생산되고 있는 것을 이용하였으며 이들 화학적 특성은 Table 3과 같다.

(3) AE제

Table 1. Chemical composition of high sulphated cement

Chemical Composition(%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.loss
20.3	5.4	2.4	60.9	2.9	0.12	0.75	1.2

Table 2. Physical properties of high sulfated cement mortar at steam curing.

Specific Gravity	Soundness	Setting Time		* Compressive Strength (kg/cm ²)			
		Int. (min)	Fin. (Hr:min)	1	3	7	28
				day	days	days	days
3.12	0.06	300	7:45	439	441	507	616

* Steam curing 65°C, 5hrs

Table 3. Chemical composition of Fly Ash

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.loss	Sum
54.7	28.2	6.3	4.7	1.1	0.99	0.8	2.6	99.39

Table 4. Physical properties of AE Agent

Name	Appearance	Spec. gravity	Specification
DAREX-AEA	Brown	1.03	ASTM C-260

국내 유통 D사 제품인 AE제를 사용하였고 이들 물리적 특성은 Table 4와 같다.

(4) 고성능감수제

실험에 사용된 고성능감수제는 Mighty-150을 사용하였다. 이 때 물리적성질은 Table 5.와 같다.

(5) 골재

금강산 25mm 쇄석과 잔골재를 사용하였다.

2.2. 실험계획 및 내용

(1) 작업성과 강도 특성

고황산염시멘트와 고황산염시멘트에 플라이애쉬를 10% 첨가한 고강도 콘크리트 제조시 단위시멘트량과 물시멘트비 변화 및 고성능감수제 변화에 따른 작업성과 압축강도 및 휨강도 측정을 위한 배합설계는 Table 6과 같이 계획하였다.

Table 5. Physical properties of high range water reducing agent

Name	Appearance	Spec. gravity	PH	ASTM C494 Solid base
Mighty-150	Dark Brown	1.2	7~9	45%

Table 6.

Kind of cement	Unit cement content (kg/m ³)	W/ (C+F) (%)	H.W.R.A (C×wt%)	Unit weight(kg/m ³)				
				Cem-ent	Wat-er	Sand	Aggr-egate	Fly Ash
High Sulphated cement	450	30	1.5	450	135	752	1142	
		30	2.5	450	135	752	1142	
		36	1.5	450	162	724	1099	
		36	2.5	450	162	724	1099	
	550	30	1.5	550	165	688	1043	
		30	2.5	550	165	688	1043	
		36	1.5	550	198	653	991	
		36	2.5	550	198	653	991	
650	30	1.5	650	195	623	945		
	30	2.5	650	195	623	945		
	36	1.5	650	234	582	883		
	36	2.5	650	234	582	883		
High Sulphated cement + Fly Ash (10%)	450	30	1.5	405	135	747	1136	45
		30	1.5	405	135	747	1136	
		36	2.5	405	162	719	1091	
		36	2.5	405	162	719	1091	
	550	30	1.5	495	165	681	1033	55
		30	1.5	495	165	681	1033	
		36	2.5	495	198	647	981	
		36	2.5	495	198	647	981	
	650	30	1.5	585	195	615	933	65
		30	1.5	585	195	615	933	
		36	2.5	585	234	574	872	
		36	2.5	585	234	574	872	

- Steam cured at 65°C for 5hr

- s/a : 40%

(2) 동결융해 저항성

고황산염시멘트 및 플라이애쉬 10%를 첨가한 고강도 콘크리트의 동결융해 저항성을 보통시멘트와 비교·검토하기 위하여 Table 7과 같이 단위시멘트량 500kg/m³의 간헐 공기량이 1% 내외의 슬럼프 8cm 인 Non-AE 콘크리트와 연행공기량이 4.5% 내외인 AE 콘크리트의 물·시멘트비 변화에 따른 특성을 검토하였고, 이 때 동일 작업성 유지를 위한 슬럼프

Table 7. Mix proportion of high strength concrete for durability

Cement	Kinds of Concrete	Sample No.	W/C+F (%)	Unit weight(kg/m ³)					
				Cement+ Fly Ash	Water	Sand	Agg.	H.W.R.A	AE
High Sulphated cement	Non-AE Concrete	H-33-Non	33	500	165	704	1069	0.96	-
		H-30-Non	30	500	150	720	1093	2.13	-
		H-27-Non	27	500	135	736	1116	4.58	-
	AE Concrete	H-33-AE	33	500	165	657	998	0.78	0.04
		H-30-AE	30	500	150	676	1021	1.96	0.04
		H-27-AE	27	500	135	689	1045	4.21	0.08
High Sulphated cement + 10% Fly Ash	Non-AE Concrete	HF-33-No	33	500	165	698	1060	0.87	-
		HF-30-No	30	500	150	714	1084	1.95	-
		HF-27-No	27	500	135	730	1107	4.35	-
	AE Concrete	HF-33-AE	33	500	165	651	988	0.65	0.06
		HF-30-AE	30	500	150	667	1012	0.08	0.06
		HF-27-AE	27	500	135	683	1036	4.10	0.10
Ordinary portland cement	Non-AE Concrete	0-33-Non	33	500	165	706	1071	0.75	-
		0-30-Non	30	500	150	722	1095	1.39	-
		0-27-Non	27	500	135	737	1119	4.29	-
	AE Concrete	0-33-AE	33	500	165	659	999	0.64	0.03
		0-30-AE	30	500	150	675	1024	1.26	0.03
		0-27-AE	27	500	135	691	1047	3.90	0.07

ex) H-33-Non (High Sulphated cement - W/C 33%-Non-AE Concrete)

HF-30-Non(High sulphated cement with Fly Ash - W/C+F 30%-Non-AE concrete)

0-27-AE (Ordinary cement - W/C 27%-AE concrete)

조절은 고성능감수제로 조절하고 연행공기량 조절은 공기연행제로 조절하였다.

(3) 건조수축

고황산염시멘트 및 플라이애쉬를 10% 첨가한 고강도콘크리트의 건조수축 시험을 보통시멘트와 비교·검토하기 위하여 Table 7중의 Non-AE 콘크리트를 대상으로 실험하였다.

(4) 화학저항성

Table 7과 같은 배합중 보통시멘트와 고황산염시멘트 및 플라이애쉬 10%를 첨가한 Non-AE 콘크리트 배합을 이용하여 미경화된 콘크리트를 5mm체로 채가름한 다음 5cm 입방체의 모르타 공시체를 재령별로 3개씩 제작하여 7일간 양생조건별로 양생시킨 후 35% 황산나트륨 용액에 침지 기간별 손실증량 백분율로 구하였다.

(5) 고황산염시멘트와 중성화

고황산염시멘트와 고황산염시멘트에 플라이애쉬를 10% 첨가한 고강도 콘크리트의 중성화 시험은 Table 8과 같이 계획하였고 적용 배합은 동결융해 저

Table 8. Experimental design for concrete carbonation

Kind	W/C+F (%)	Unit weight(kg/m ³)					AE
		Cement	Water	Sand	Aggregate	H.W.R.A	
High Sulphated cement	33	500	165	657	998	0.78	0.04
	30	500	150	676	1021	1.96	0.04
	27	500	135	689	1045	4.21	0.08
High Sulphated cement + 10% Fly Ash	33	500	165	651	988	0.65	0.06
	30	500	150	667	1012	1.85	0.06
	27	500	135	683	1036	4.10	0.10
Ordinary portland cement	33	500	165	659	999	0.64	0.03
	30	500	150	675	1024	1.26	0.03
	27	500	135	691	1047	3.90	0.07

항성 시험에 이용되었던 AE 콘크리트로 검토하였다.

2.3 측정방법

(1) 압축강도시험

콘크리트의 압축강도는 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 의 원주형

공시체를 사용하여 측정하였으며 실험시편은 KS F 2405에 준하여 진동봉으로 제작하였다.

(2) 휨강도시험

15×15×55cm의 몰드로 공시체를 제작하였으며, 시편의 제작 및 휨강도 측정은 KS F 2408에 의거하였다.

(3) 동결융해

동결융해 시험은 KS F 2456에 의한 수중 급속동결융해에 의하고 공시체는 재령 14일에서 시험하였다. 각 공시체는 시험전에 초기 동탄성계수를 측정하고 시험이 진행됨에 따라 30cycle마다 상대 동탄성계수를 측정하였으며 실험도중 상대 동탄성계수가 60이하가 되었을 때 시험을 완료하여, 실험자료로부터 내구성지수를 도출하였다.

(4) 건조수축

KS F 2424의 콘크리트의 길이변화 시험에 의거하여 각 재령별로 건조수축량을 측정하였다.

(5) 화학저항성

화학저항성은 미경화콘크리트를 5mm체로 체가름한 모르터를 이용하여 5센티미터 입방체의 공시체를 재령별로, 양생 조건별로 각 3개씩 제작하여 7일간 표준양생과 증기양생 시키고 6일간 수중 양생한 시료를 35% 황산나트륨용액에 침지기간별로 손실중량 백분율(%)을 측정하였다.

(6) 중성화

φ10×20cm의 콘크리트 공시체를 65℃로 5시간 증기양생 시킨후 중성화시험기를 이용하여 탄산가스 농도 10%, 온도 40℃, 습도 50%인 조건에서 각재령별로 보관시켰다. 각 재령시 공시체를 반으로 절단하여 페놀프탈레인 1% 용액으로 절단부분을 분무기로 분무하였다. 이때 중성화 되지 않은 건전부의 콘크리트는 적색으로 발색이 되지만 중성화된 콘크리트는 무색으로 나타나는데 이들 무색의 평균깊이를 중성화 침투 깊이로 하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 플라이애쉬가 高黃酸鹽시멘트의 작업성과 강도 특성에 미치는 영향

고황산염시멘트와 고황산염시멘트에 10% 플라이애쉬를 첨가한 고강도 콘크리트의 작업성과 압축 및 휨강도 측정결과를 보면 재령 28일의 압축강도는 평균 810kg/cm²내외이며 최고강도를 904kg/cm²까

Fig. 1(a). Relationship between slump and cement contents at H. W. R. A 1.5%

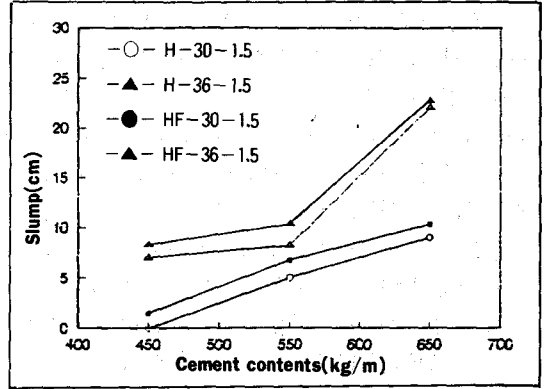
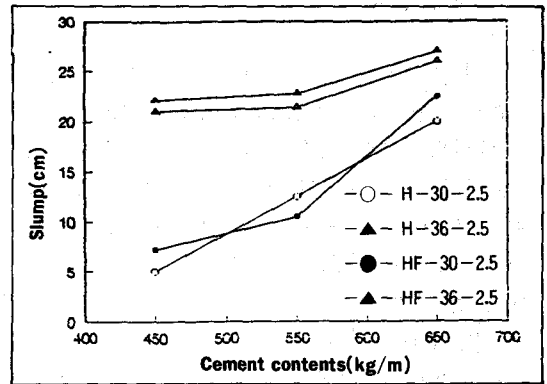


Fig. 1(b). Relationship between slump and cement contents at H. W. R. A 2.5%



지 얻었고 플라이애쉬를 10% 첨가한 경우의 강도 발현 증진은 그다지 크지 않아 최고 강도 913kg/cm² 까지 얻었다. 일반적인 콘크리트의 압축강도에 대한 휨강도의 비가 보통콘크리트의 경우 5~7정도 범위인데 비하여 고황산염시멘트 콘크리트의 경우에는 약 9 정도로 휨강도의 증진이 크게 개선되었다. 이는 보통콘크리트를 이용한 고강도 콘크리트보다 고황산염시멘트나 10% 플라이애쉬를 첨가한 고강도 콘크리트의 수화물 조직이 치밀하게 형성된 원인으로 휨강도가 증가된 것으로 판단된다. 콘크리트의 작업성은 Fig. 1과 같이 플라이애쉬를 첨가할 경우 고황산염시멘트 경우 보다 대체적으로 1~2cm 양호하게 나타났으며, 단위시멘트량 증대에 따라 약간 증가되는 경향을 보이고 있다.

3.2. 플라이애쉬가 고황산염시멘트의 동결융해 저항성에 미치는 영향

시멘트종류, 물시멘트비 변화에 따른 AE 콘크리트

및 Non-AE 콘크리트를 증기양생하여 14일간 수증양생후 각 사이클 변화에 따른 상대 동탄성계수와 내구성지수를 측정된 결과를 보면 물·시멘트비가 높더라도 AE 콘크리트로 제조할 경우에는 동결융해를 300회 실시하여도 내구성이 양호하였는데 이는 AE 콘크리트로 제조시 연행된 미립의 공기포가 동결에 의한 내압을 완충시키기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 Non-AE 콘크리트에서의 동결융해에 의한 내구성은 고허산염시멘트 및 플라이애쉬 10% 첨가할 경우 보통시멘트의 경우보다 양호하나 300회까지 견디지 못하므로 내구성을 고려할 콘크리트일 경우에는 필히 AE 콘크리트로 제조되어야 할 것으로 본다.

3.3. 플라이애쉬가 고허산염시멘트의 건조수축에 미치는 영향

고황산염시멘트와 플라이애쉬를 이용한 고강도 콘크리트의 건조수축 시험결과는 Non-AE 콘크리트를 대상으로 하여 표준양생과 증기양생 조건을 비교 검토하였으며 Fig. 2와 같이 표준양생시 건조수축은 재령 90일에서 보통시멘트의 경우 평균 3.47×10^{-4} 이며 고허산염시멘트는 3.21×10^{-4} , 플라이애쉬 10% 첨가시에는 평균 3.20×10^{-4} 로 건조수축이 약 7% 감소효과가 나타났다.

한편 Fig. 3과 같이 증기양생으로 실시한 경우 재령 90일의 보통시멘트에서 평균 2.55×10^{-4} 고허산염시멘트는 약 2.30×10^{-4} 로 약 10% 건조수축 감소효과가 나타났으며, 플라이애쉬를 첨가한 고허산염시멘트는 약 2.22×10^{-4} 로써 보통시멘트에 비해 약 13% 건조수축 감소효과가 나타났다.

특히 증기양생으로 한 경우 고허산염시멘트는 표준양생시 보다 건조수축 값이 약 28% 감소되어 증기양생시 건조수축에 의한 균열방지의 개선효과가 크게 있음을 나타내는데 이는 촉진양생에 의한 초기강도 발현으로 인한 수화물 골격 형성으로 건조수축이 감소된 것으로 판단된다. 한편 물시멘트비가 낮을수록 건조수축 값이 감소되는데 이는 단위 수량감소에 의한 건조수축 감소로 판단된다.

3.4. 플라이애쉬가 고허산염시멘트의 화학저항성에 미치는 영향

양생방법별로 7일간 양생시킨후 35% 황산나트륨 용액에 각 재령별로 무게 손실중량백분율(%)을 측

Fig. Test results of relative dynamic elastic modulus at steam curing condition

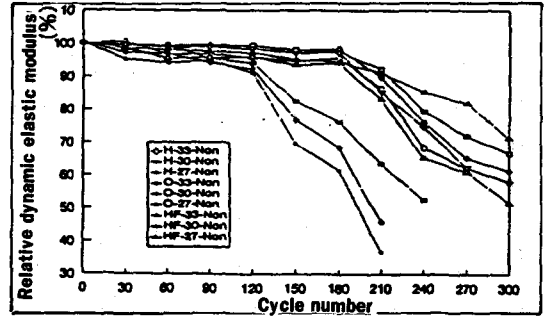


Fig. Test results of relative dynamic elastic modulus at steam curing condition

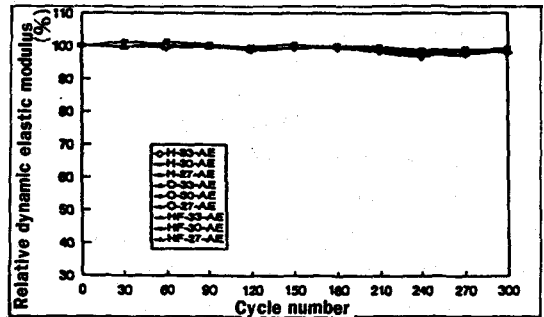


Fig. 2. Drying shrinkage of high strength concrete at each W/C+F ratio at standard curing condition

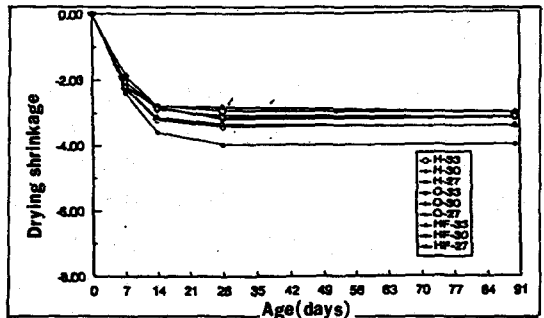


Fig. 3. Drying shrinkage of high strength concrete at each W/C+F ratio at standard curing condition(63°C, 5hr)

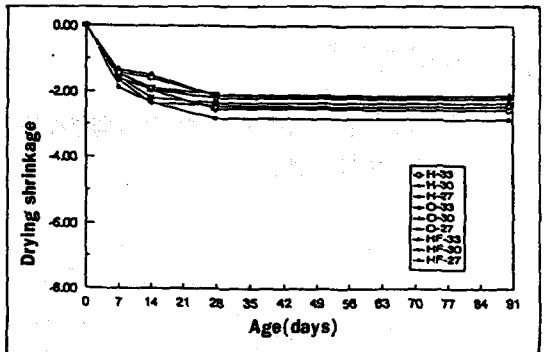


Table. Test results of weight loss at 35% sodium sulphate solution

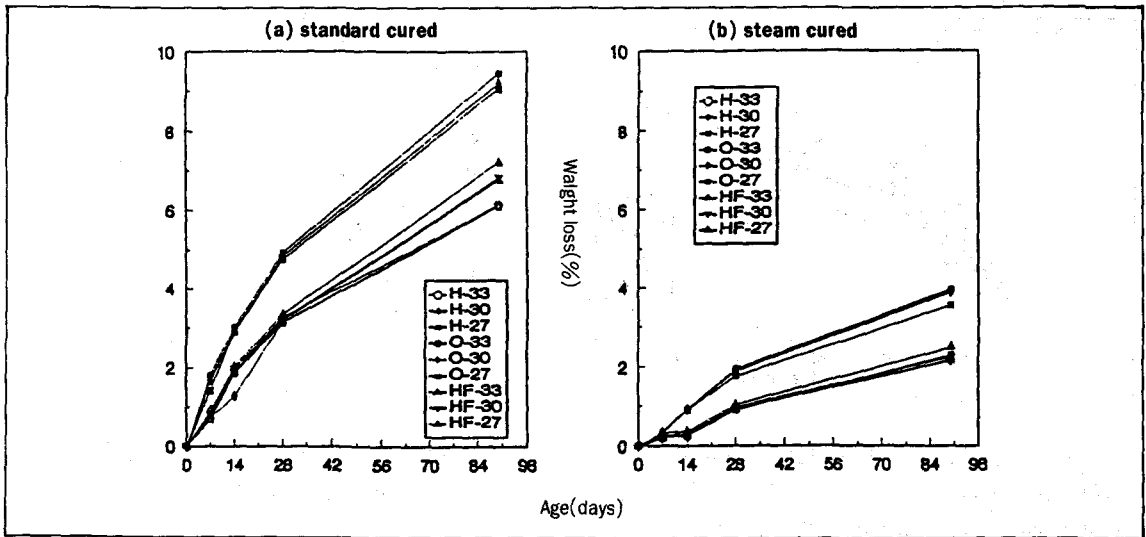


Table . Test results of carbonation at each cement

Kinds of Cement	Sample No	W/C+F(%)	Depth of carbonation(mm)		
			7 days	28 days	90 days
High Sulphated cement	H-33-AE	33	1.9	5.1	8.2
	H-30-AE	30	1.8	4.8	7.7
	H-27-AE	27	1.5	3.6	7.2
High Sulphated cement + 10% Fly Ash	HF-33-AE	33	2.1	5.8	8.6
	HF-30-AE	30	1.9	5.1	8.3
	HF-27-AE	27	1.7	4.5	7.9
Ordinary portland cement	O-33-AE	33	3.3	6.4	9.5
	O-30-AE	30	2.8	5.6	8.9
	O-27-AE	27	2.3	4.5	8.3

ex) H-33-AE (High Sulphated cement - W/C 33% - AE Concrete)

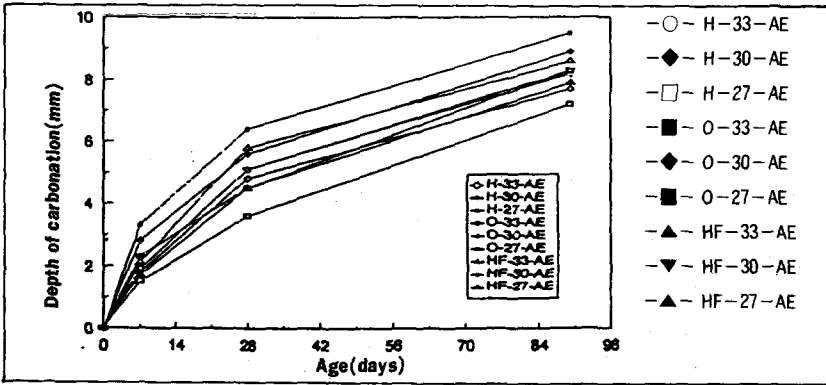
정한 결과 채령 90일의 표준양생시 고탄산염시멘트는 6.13%의 손실중량을 보이고 있으나 보통시멘트의 경우에는 9.25%의 값을 나타내 고탄산염시멘트가 약 34% 화학저항성 개선효과가 나타났으며, 플라이애쉬를 첨가한 경우 보통시멘트에 비해 약 25%의 개선효과가 나타나 고탄산염시멘트 단독 사용시 화학저항성이 가장 양호함을 알 수 있다. 한편 고탄산염시멘트 콘크리트를 증기양생을 실시한 경우에는 표준양생시 보다 손실중량이 50%정도 대폭 감소되어 화학저항성의 개선효과가 표준양생에서의 시멘트 종류에 의한 개선효과 보다 더 크게 나타났다. 이러한 원인은 증기양생으로 실시한 경우 고탄산염 시멘트는 에트린

자이트 수화물로 내부조직을 치밀하게 하여 가용성 염류의 침투가 어렵고 이로 인해 화학저항성을 개선시킨 것으로 판단된다.

3.5 플라이애쉬가 고탄산염시멘트의 중성화에 미치는 영향

90일간 축진 시험한 중성화 깊이를 시멘트 종류별로 고찰하여 보면 고탄산염시멘트는 평균 7.7mm로써 보통시멘트의 8.9mm보다 약 13%의 중성화 감소효과가 나타났으며 플라이애쉬를 첨가할 경우 약 7% 개선효과가 있으나 고탄산염시멘트 단독 사용시

Fig. Relationship between depth of carbonation and ages



보다 중성화가 약간 많이 발생되었다. 특히 고허산염 시멘트 단독 사용시 중성화가 양호한 원인은 콘크리트 미세구조를 전자현미경으로 관찰한 결과에서 보이듯이 고허산염시멘트의 콘크리트 조직이 보통 시멘트의 콘크리트 조직보다 치밀하기 때문에 중성화가 작게 발생된 것으로 보인다.

또한 물시멘트비 종류별로 볼때 물시멘트비가 크면 클수록 중성화가 많이 발생되어 물시멘트 27% 기준 으로는 보통 시멘트의 경우 재령 90일간 촉진 시험한 중성화 깊이는 물시멘트비가 30%인 경우에 중성화 깊이가 7% 증가하였으며 물시멘트비가 33%인 경우에는 중성화 깊이가 14% 더 많이 발생되어 물시멘트 비에 의해 중성화가 크게 좌우됨을 알 수 있다. 이는 콘크리트내의 페이스트 부분의 조직이 밀실하지 못한 원인으로 판단된다.

4. 결론

고황산염시멘트 콘크리트 작업성 향상과 장기 강도 향상을 목적으로 플라이애쉬를 10% 첨가한 경우의 작업성과 압축강도 및 내구특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) 고허산염시멘트에 플라이애쉬 10%를 첨가한 경우 콘크리트 슬럼프 값은 1~2cm증가되고 있으나 단위시멘트량 증가에 따라 약간 증가 되는 경향이다.
- (2) 고허산염시멘트에 플라이애쉬 10%를 첨가한 콘크리트의 압축강도 증진 효과는 크지 못하다.
- (3) 동결융해 저항성은 Non-AE 콘크리트로 제조시 고허산염시멘트에 플라이애쉬 10%를 첨가한 경우 고허산염시멘트 단독 사용시 보다

약간 저하현상을 보이고 있으나 AE 콘크리트로 제조한 경우에는 동결융해 저항성이 모두 양호하게 나타났다.

- (4) 건조수축은 고허산염시멘트에 플라이애쉬 10%를 사용하므로써 보통콘크리트에 비해 13%의 건조수축 감소효과가 뚜렷하게 나타났다.
- (5) 황산나트륨 용액에 의한 화학저항성은 고허산염시멘트의 경우 34% 개선효과가 나타났으며 플라이애쉬를 10% 첨가한 경우 약 25% 개선 효과가 나타났다. 한편 증기양생을 실시할 경우에는 고허산염시멘트나 고허산염시멘트에 플라이애쉬 10%를 첨가한 콘크리트가 보통 콘크리트에 비해 약 50%의 개선효과가 나타났는데 이는 에트린자이트 수화물이 내부조직을 치밀하게 함으로써 가용성염류의 침투가 어렵기 때문에 화학저항성이 개선된 것으로 판단된다.
- (6) 콘크리트 중성화에 미치는 영향은 고허산염시멘트는 보통시멘트에 비해 13% 중성화 감소 현상이 보이고 있으며 고허산염시멘트에 플라이애쉬를 10% 첨가한 경우 약 7%의 개선효과가 나타났다.
- (7) 이들 결과를 종합하면 고허산염시멘트 단독으로 고강도콘크리트 제조가 가능하나 플라이애쉬를 10% 첨가하여 작업성 개선과 강도향상을 목적으로 하였으나 기대 이상의 작업성 개선과 강도 증진효과는 나타나지 않았으며 내구 특성면에서도 건조수축외에 개선효과가 나타나지 않아 플라이애쉬 사용에 주의가 요구된다.