플라이 애시 및 석고를 활용한 고강도 콘크리트의 성능개선

Improvement of Properties of High Strength Concrete Using Fly Ash and Gypsum

김 기 형* Kim, Ki-Hyung　**최 재 진**** Choi, Jae-Jin　**최 연 왕***** Choi, Yun-Wang

ABSTRACT

In producing high strength concrete, the most practical method is to use high range water reducing admixture(HRWR). Workability of concrete using HRWR varies rapidly with elapsed time after mixing. Effects of fly ash and gypsum on slump loss and compressive strength of concrete were examined by experiment in this study. The slump loss of high strength concrete was reduced with increase of substitution ratio of fly ash. When 2~4% gypsum of cement weight was applied, the reduction of slump loss was not prominent and strength increase appeared at all test ages.

Keywords : high strength concrete, fly ash, gypsum, slump loss, compressive strength

* 정회원, 여주대학 토목과 조교수
** 정회원, 천안공업대학 토목과 부교수
*** 정회원, 세명대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 2000년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

플라이 애시를 콘크리트용 재료로 활용하는 것은 콘크리트의 물성 향상 뿐만 아니라 환경보호 및 폐자원의 재활용 차원에서도 매우 유익한 일로서 특히 고강도 콘크리트의 품질개선에 매우 유효한 혼화재료로 사용될 수 있는 가능성이 높다. 구미 및 일본에서는 30여년 이상 계속적으로 플라이 애시 이용기술이 개발되고 있으며 각종 산업 분야에 응용하여 최근에는 재활용율이 60% 이상이나 우리 나라의 경우는 현재 연간 약 300 만톤의 플라이 애시가 발생하여 그 중에서 20% 정도만이 재활용되고 있는 실정이다.[1)]

일반적으로 고성능감수제를 사용한 고강도 콘크리트는 경과시간에 따른 유동성 손실이 크게 발생하여 특별한 주의가 필요하다.[2,3)] 플라이 애시를 혼화재로 사용하면 유동성 유지성능이 다소 증가되지만 플라이 애시 혼합률의 증가에 따라서 경화한 콘크리트의 초기강도가 저하되는 것이 문제점으로 지적된다. 그러므로 고강도 콘크리트 혼화재로서 플라이 애시의 활용성을 높이기 위해서는 굳지 않은 콘크리트의 유동성 유지성능을 재고하면서 경화한 콘크리트의 초기강도 저하를 방지하는 실용적인 방안이 필요하다.

본 연구에서는 플라이 애시가 고성능감수제를 사용한 고강도 콘크리트의 유동성 유지성능 및 강도에 미치는 영향을 분석하고 플라이 애시를 사용한 고강도 콘크리트의 유동성을 유지시키면서 플라이 애시 사용에 따른 경화한 콘크리트의 초기강도 저하를 방지하고자 한다.

플라이 애시를 사용한 고강도 콘크리트의 초기강도 향상방안 중에서 석고를 첨가하는 방법을 시험적으로 선택하여 검토하였으며, 석고의 첨가에 따른 플라이 애시-석고-시멘트계의 물성 변화 중에서도 본 연구에서는 모르터 및 콘크리트의 유동성 유지성능 및 압축강도를 주로 고찰함으로서 플라이 애시를 사용하여 제조한 고강도 콘크리트의 기초성능 개선방안에 대한 실험적 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

(1) 시멘트와 플라이 애시 : 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드시멘트(OPC로 약함)이며 플라이 애시(FA로 약함)는 국내화력발전소에서 발생된 것으로서 KS L 5405의 분말도 및 강열감량의 규격을 만족하는 시료로서 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

(2) 석고 : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$가 99.5 % 이상인 미세분말형 공업용 석고를 사용하였다.

(3) 화학혼화제 : 나프탈린계 고성능감수제를 사용하였으며 주성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다.

(4) 골재 : 한강산 강모래와 강자갈을 사용하였으며 물리적 성질은 Table 3과 같다.

2.2 실험기기 및 방법

(1) 현탁액의 침강시험 : 고성능감수제를 1% 첨가한 물-결합재비 100%의 현탁액을 모르터 믹서로 3분간 믹싱하여 제조한 후 500㎖ 메스실린더에 넣고 침강량을 측정하여 시멘트 입자의 응집 정도를 나타내는 지수로 나타내었다.

(2) X선 회절분석 : 시멘트풀의 수화생성물을 알아보기 위하여 물-결합재비 32%로 제조한 시멘트풀의 혼합 후 경과시간 1시간에서 시료를 샘플링하여 아세톤으로 수분을 제거시킨 후 시료를 분말처리하였으며, 플라이 애시 및 석고를 사용한 시멘트 경화체의 수화생성물을 알아보기 위하여 재령 28일된 시멘트 경화체를 분말 처리하여 X선 회절분석을 실시하였다. 측정

Table 1 Chemical compositions and physical properties of cement and fly ash

Items	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Ig. loss (%)	Specific gravity	Specific surface area (cm^2/g)
OPC	22.0	6.6	2.8	60.1	3.3	2.1	2.6	3.15	3,110
FA	68.0	25.0	2.9	2.0	0.9	-	3.5	2.15	4,550

Table 2 Chemical component and physical properties of high range water reducing admixture

Chemical component	Appearance	Specific gravity	pH	Recommended dosage(C×%)
Naphthalene sulfonate composites	Dark brown	1.20	9.5	1.0

Table 3 Physical properties of aggregate

Items	G_{max} (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.	Organic impurities	Unit weight (kg/m^3)	Percentage of solid (%)
Fine agg.	-	2.60	2.0	2.67	O.K	1,620	62.3
Coarse agg.	19	2.67	1.13	7.00	-	1,725	66.1

조건은 다음과 같다. {Target:Cu, 35kv, 20mA, Scan speed:10° /min, 2θ: 5° ~ 60° }

(3) 모르터의 플로우 시험 : 시멘트와 잔골재의 중량비 1 : 1, 물-결합재비 32 %, 플로우값 210mm의 모르터를 제조한 후 KS L 5105에 의하여 경과시간 30분 간격으로 플로우값의 변화를 측정하였다.

(4) 콘크리트의 슬럼프 시험 : 용량 50 ℓ의 강제식 믹서를 사용하여 시멘트, 잔골재를 먼저 투입하여 1분간 건비빔한 다음 나머지 재료를 첨가하여 전체 3분 30초간 믹싱한 후 가경식 믹서로 옮겨 2rpm속도로 회전하면서 경과시간 120분까지 30분 간격으로 KS F 2402에 의하여 슬럼프값을 측정하였다.

(5) 모르터 및 콘크리트의 강도시험 : 모르터는 플로우 시험과 동일한 배합으로 제조한 후 5×5×5 cm의 입방체를 만들고, 콘크리트는 Φ10×20cm 원주형 공시체로 제작하여 표준양생한 후 각각 KS L 5105 및 KS F 2403의 규정에 의해서 압축강도를 측정하였다.

2.3 콘크리트의 배합

고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 Table 4에 나타낸 바와 같이 단위결합재량 600kg/m^3, 물-결합재비 32%, 28%, 잔골재율 42%로 정하였으며 슬럼프값은 19cm로 하였다.

3. 실험결과에 대한 고찰

3.1 콘크리트의 유동성 유지성능

굳지 않은 콘크리트의 유동성 손실은 사용재료, 배합, 제조방법 및 온도 등의 여러 요인에 의하여 크게 영향을 받는다.[3] 특히 고성능감수제를 사용하며 물-시멘트비가 작고 단위시멘트량이 큰 고강도 콘크리트의 경우는 유동성 손실이 크게 나타난다.[2] 플라이 애시가 고강도 모르터 및 콘크리트의 유동성 손실에 미치는 영향을 알아보기 위하여 혼합률을 3단계로 하여 경과

Table 4 Concrete mix proportion

W/(C+FA) (%)	FA/(C+FA) (%)	Unit weight (kg/m^3)				
		W	C	FA	S	G
32	0	195	600	0	649	921
	10	195	540	60	640	907
	20	195	480	120	630	893
	30	195	420	180	620	880
28	0	168	600	0	679	962
	10	168	540	60	669	949
	20	168	480	120	659	935
	30	168	420	180	650	921

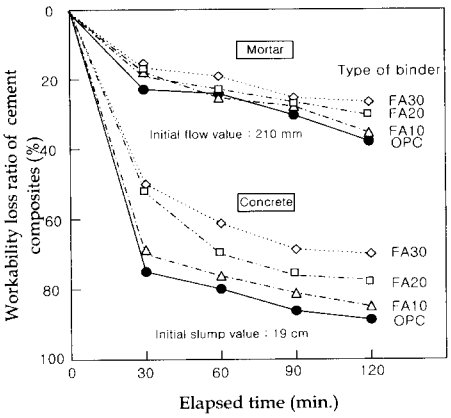

Fig. 1 Workability loss ratio of mortar and concrete

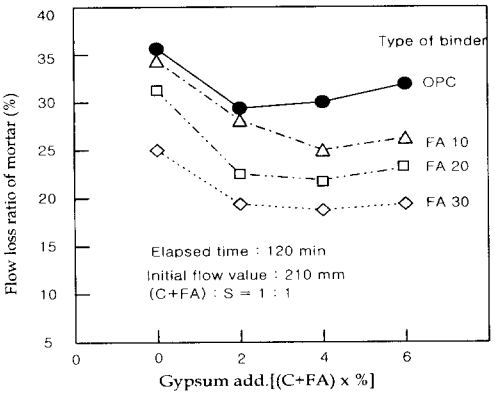

Fig. 2 Flow loss ratio of mortar using fly ash and gypsum

시간에 따른 유동성 손실률을 비교한 것이 Fig. 1이다.

플라이 애시 혼합률이 증가하면서 모르터 및 콘크리트의 유동성 손실률이 얼마간 감소하며, 플라이 애시를 30% 혼합한 시멘트(FA30)가 보통포트랜드시멘트(OPC)보다 경과시간 120분에서 15%정도 슬럼프 손실률이 감소되었다.

플라이 애시가 모르터 및 콘크리트의 유동성 손실을 감소시키는 이유는 혼합률 만큼 시멘트량이 감소되어 수화량이 감소되고, 입자모양이 구형이고 매끄러운 표면조직을 가진 플라이 애시가 입자간의 물리적인 마찰감소 작용 및 응집을 희석시키는 역할[4]을 하기 때문으로 판단된다.

한편 고성능감수제를 사용한 시멘트 복합체의 유동성 손실은 시멘트 조성광물 중 초기 수화반응성이 활발한 C_3A와 석고와의 반응정도에 따라서 큰 영향을 받으며, 석고는 C_3A의 초기 수화를 억제시키는 작용을 한다.[5]

석고가 플라이 애시 혼합 모르터의 유동성 손실에 미치는 영향을 알아보기 위하여 석고를 단위 결합재량의 3단계로 첨가하여 경과시간 120분에서 플로우 손실률을 비교한 것이 Fig. 2이다.

석고의 첨가량 및 플라이 애시 혼합률에 따라서 플로우 손실에 차이가 있으며, 플라이 애시를 30% 혼합한 시멘트에 석고를 단위결합재량에 대해 2~4% 첨가한 경우 플로우 손실률이 가장 작게 나타났다.

한편 시멘트 복합체의 유동성 손실은 개개의 시멘트 입자가 경과시간에 따라서 응집하여 망상구조의 응집체를 형성하므로써 점성이 커지는 과정과 밀접한 관련성이 있다.[6]

석고 및 플라이 애시에 의한 결합재 입자의 응집효과가 모르터 및 콘크리트의 유동성 손실 저감현상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 석고를 2% 첨가한 현탁액 중의 결합재 입자의 침강량과 콘크리트의 슬럼프 손실률을 경과시간에 따라 비교한 것이 Fig. 3이다.

보통포틀랜드시멘트에 석고를 첨가하지 않은 경우가 침강량과 슬럼프 손실률이 가장 크게 나타났으며, 플라이 애시를 30% 혼합한 시멘트에 석고를 2% 첨가한 경우가 침강량과 슬럼프 손실률이 가장 작게 나타났다. 그러나 보통포틀랜드시멘트에 석고만을 2%

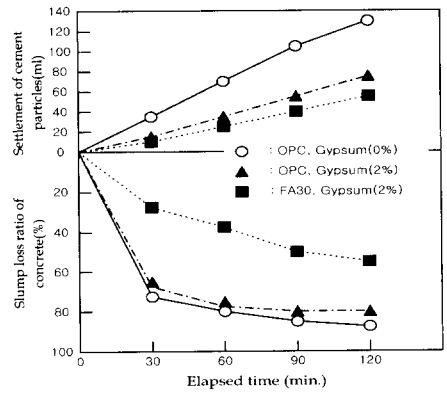

Fig. 3 Settlements of cement particles and slump loss ratio of concrete

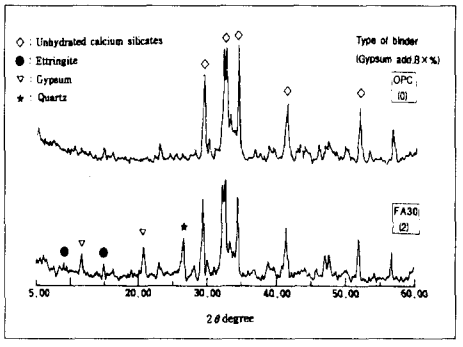

Fig. 4 X-ray diffraction diagram of cement paste

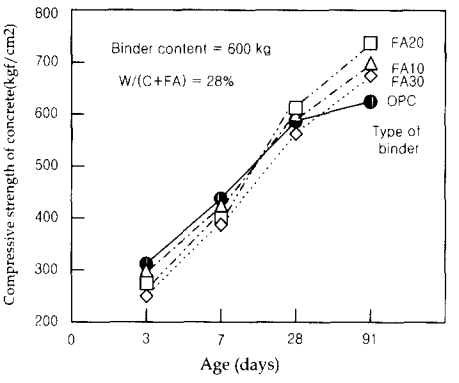

Fig. 5 Compressive strength of concrete

첨가한 경우는 석고를 첨가하지 않은 보통포틀랜드시멘트 콘크리트와 비슷한 슬럼프 손실률을 나타내고 있는 것으로 보아서 석고가 보통콘크리트에서는 유동성 손실 저감에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

한편 유동성 손실이 가장 크게 나타난 보통포틀랜드시멘트 만을 사용한 것과 유동성 손실이 가장 작게 나타난 플라이 애시 30% 혼합 시멘트에 석고를 2% 첨가한 시멘트풀을 각각 제조하여 각각 경과시간 60분에서 X선 회절 분석한 결과가 Fig. 4이다.

경과시간 60분에서는 시멘트의 수화생성물이 뚜렷하게 나타나지 않으며 대부분 칼슘실리케이트계 미수화물이 나타나고 있다. 플라이 애시를 30% 혼합하고 석고를 2% 첨가한 시료에서는 칼슘실리케이트계 미수화물의 피크가 약간 감소하며 석고와 C_3A와의 반응에 의한 수화생성물인 에트린가이트와 플라이 애시 성분인 석영 및 아직 미용해된 석고가 나타났다.

Fig. 3과 Fig. 4의 결과로 부터 플라이 애시를 30% 혼합사용하면 30% 만큼 시멘트의 초기 수화활성도가 감소하며 플라이 애시의 구형입자가 유동성 유지기능을 하는 효과가 있어서 유동성 손실을 저감하는데 유효하였다고 판단된다. 아울러 시멘트 풀 속의 미용해된 석고로부터 SO_4^{2-}이온의 용출에 따른 고성능감수제의 시멘트 분산작용의 도움효과[5] 도 유동성 손실 저감에 약간의 유효한 효과를 미친 것으로 추정된다.

3.2 콘크리트의 강도특성

플라이 애시가 고강도 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 혼합률을 10, 20, 30 % 의 3단계로 하여 제조한 콘크리트의 재령별 압축강도를 정리한 것이 Fig. 5이다.

재령 3일, 7일에서는 플라이 애시 혼합률이 클수록 압축강도의 발현성이 작게 나타나며, 플라이 애시 30%를 혼합한 시멘트의 경우는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비하여 각각 10%와 5% 씩 강도가 작게 나타났다. 그러나 재령 28일 이후에는 플라이 애시의 포졸란 반응의 영향으로 압축강도가 보통포틀랜드시멘트 콘크리트와 같거나 크게 발현된다. 그러므로 플라이 애시를 고강도 콘크리트에 효율적으로 활용하기 위해서는 플라이 애시 혼합에 따른 초기재령에서의 압축강도 저하 방지방안이 필요함을 알 수 있다.

플라이 애시를 혼합한 시멘트 경화체의 압축강도를 향상시킬 목적으로 석고를 단위결합재량에 0, 2, 4%의 3단계로 첨가하여 제조한 모르터의 압축강도를 플라이 애시 혼합률 및 재령에 따라서 정리한 것이 Fig. 6이다.

모르터의 종류에 따라서 차이는 있으나 석고를 첨가하면 보통포틀랜드시멘트 만을 사용한 것 뿐만 아니라 플라이 애시를 사용한 모르터에서 강도가 얼마간 향상되고 있음을 알 수 있으며, 재령 28일 강도를 기준으로 했을 때 단위결합재량의 2%를 첨가한 경우가 강도 향상에 대체로 가장 유리하게 나타났다. 플라이 애시를 혼합한 콘크리트에 석고를 2% 첨가한 콘크리트의 압축강도를 보통포틀랜드시멘트 콘크리트와 비교한 것이 Fig. 7이며, 보통포틀랜드시멘트 콘크리트를 기준으로 재령별 압축강도를 100으로 했을 때 플라이

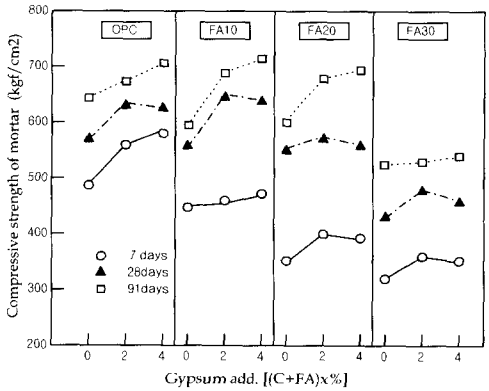

Fig. 6 Compressive strength of mortar using gypsum

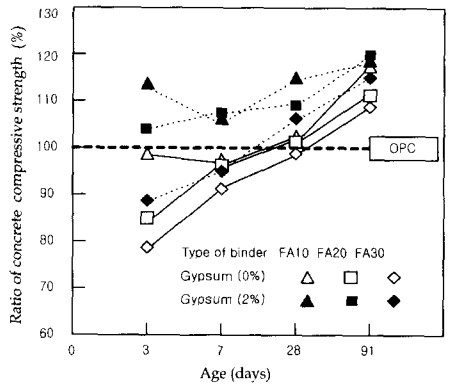

Fig. 8 Compressive strength ratio of concrete

애시 만을 혼합한 콘크리트와 플라이 애시와 석고를 2% 첨가한 콘크리트의 압축강도비를 각각 정리한 것이 Fig. 8이다.

Fig. 7에서 플라이 애시 혼합률에 따라서 약간 차이는 있으나 석고를 2% 첨가하면 Fig. 5와 비교해서 초기재령 3일에서 부터 압축강도가 대체로 향상되었음을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 강도 증가 현상은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 보통포틀랜드시멘트에 석고만을 첨가한 경우에서도 나타나는 현상으로서 플라이 애시의 혼합률의 대소에 따라서 콘크리트배합 중의 시멘트량과 첨가된 석고와의 반응성이 강도발현과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8에서 플라이 애시 만을 혼합 사용한 경우는 초기재령인 3일, 7일에서는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트보다 압축강도비가 현저하게 작게 나타나고 있으나 석고를 첨가한 경우에는 압축강도가 향상되고 있음을 알 수 있다.

기준이 되는 보통포틀랜드시멘트 만을 사용한 시멘트 풀과, 압축강도비가 가장 크게 나타난 석고첨가 플라이 애시 10% 혼합시멘트 풀을 재령 28일에서 X선 회절분석한 결과가 Fig. 9이다.

재령 28일에서는 아직 미수화된 칼슘실리케이트계 미수화물과 함께 칼슘실리케이트계 조성광물의 수화물인 수산화칼슘과 약간의 C-S-H의 피크가 나타나고 있음을 알 수 있으며 플라이 애시 10% 혼합시멘트에 석고를 2% 첨가한 경우는 수산화칼슘 이외에도 에트린가이트 및 C-S-H가 많이 생성되어 있음을 알 수 있다.

즉, 콘크리트에 석고를 첨가한 경우 콘크리트의 강

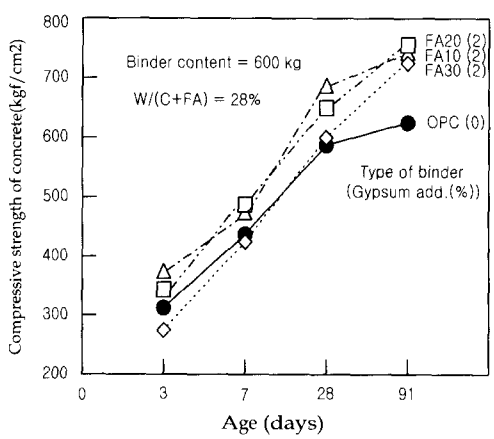

Fig. 7 Compressive strength of concrete using gypsum

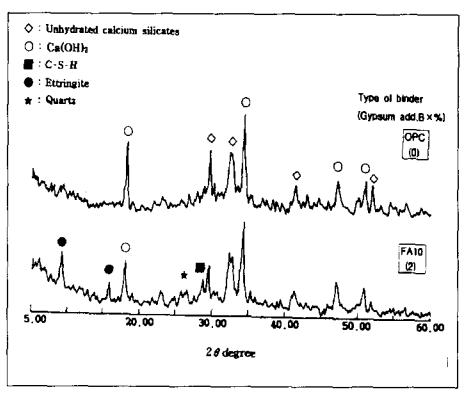

Fig. 9 X-ray diffraction diagram of cement paste at age of 28 days

도가 향상되는 이유는 시멘트와 석고와의 반응에 따라서 에트린가이트 생성량이 증가하고, 아울러 석고가 C_3S 및 C_2S의 수화를 촉진하는 효과[7]에 따라서 강도가 향상되었다고 판단되며 아울러 플라이 애시를 사용하면 플라이 애시의 포졸란 반응성이 조직을 치밀하게 하여 콘크리트의 강도향상에 얼마간 기여하였다고 생각된다.

4. 결 론

플라이 애시 및 석고를 활용한 고강도 콘크리트의 성능개선에 대한 본 연구의 실험범위 내에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 고성능감수제를 사용한 모르터 및 콘크리트의 유동성 손실은 플라이 애시의 혼합률이 클수록 저감되었으며 모르터의 경우 석고를 2~4% 첨가하면 보통포틀랜드시멘트 모르터 및 플라이 애시를 사용한 모르터의 플로우 손실률이 저감되는 효과를 나타내었으나 콘크리트의 경우 석고의 첨가에 따른 유동성 유지성능의 개선효과는 거의 나타나지 않았다.

(2) 고성능감수제를 사용한 고강도 콘크리트의 유동성 손실은 시멘트 입자의 응집에 따른 침강량, 플라이 애시의 혼합률 및 석고의 첨가여부에 따라서 영향을 받으며, 플라이 애시를 30% 혼합한 시멘트에 석고를 2% 첨가한 경우는 보통포틀랜드시멘트를 사용한경우보다 경과시간 120분에서 약 30% 정도 유동성 손실이 저감되는 결과를 나타냈다.

(3) 석고의 첨가량 변화에 따라서 보통포틀랜드시멘트 모르터와 플라이 애시를 혼합한 모르터의 압축강도는 다르게 나타나며 플라이 애시 혼합 콘크리트의 경우 초기재령에서는 플라이 애시 혼합률이 클수록 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비하여 압축강도가 작게 나타났으나 석고를 단위 결합재량의 2% 첨가한 경우는 플라이 애시 만을 사용한 경우보다 초기재령에서 압축강도비가 크게 나타났다.

참고문헌

1. 한국전력공사, 석탄회 및 탈황석고 활용 국제 워크숍, 서울, 1997, pp.29~53.
2. V. Penttala, "Possibilities of Increasing the Workability Time of High Strength Concrete", Properties of Fresh Concrete, Edited by H-J. Wierig, Chapman and Hall, Oct., 1990.
3. F. Young, "Factors Affecting Slump Loss in Superplasticizer in Concrete", Proceedings of International Symposium on Superplasticizer in Concrete, Canada, July, 1981.
4. 内川 浩, "混合セメントの水和および構造形成におよぼす混合材の效果", セメント・コンクリート, No.484, June, 1987, pp.81~93.
5. 名和豊春, 江口仁, "高性能減水劑の吸着擧動に及ぼす硫酸鹽の影響", セメント・コンクリート論文集 No.43, 1989, pp.90~95.
6. 服部健一, "スランプロスのメカニズムおよびその對策", 材料, 第29卷, 318號, pp.34~40.
7. 金基享, 高强度콘크리트의 流動性 損失 最少化와 强度向上을 위한 硏究, 漢陽大學校 大學院 工學博士 學位 論文, 1993. 12.

요 약

플라이 애시를 콘크리트용 재료로 활용하면 콘크리트의 물성향상 뿐만 아니라 폐자원의 재활용 차원에서도 매우 유익한 일이며, 고강도 콘크리트의 품질개선에 매우 유효한 혼화재료로 사용할 수 있는 가능성이 높다. 플라이 애시를 고강도 콘크리트에 사용하면 경과시간에 따른 유동성 유지성능이 다소 증가되지만 경화한 콘크리트의 초기강도가 저하하는 것이 문제점으로 지적된다. 본 연구에서는 플라이 애시가 고성능감수제를 사용한 고강도 콘크리트의 유동성 유지성능에 미치는 영향을 분석하고 플라이 애시를 사용한 고강도콘크리트의 유동성을 유지시키면서 초기강도를 향상시키기 위하여 석고를 사용하는 방안에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 연구결과, 플라이 애시는 고강도콘크리트의 유동성 손실을 감소시키며 플라이 애시를 혼합한 콘크리트는 플라이 애시의 혼합률이 증가할수록 초기재령에서 보통포틀랜드시멘트 만을 사용한 콘크리트보다 압축강도가 작게 나타났으나 석고를 단위결합재량의 2% 첨가한 경우는 초기재령에서 압축강도가 향상되는 결과를 나타냈다.

(접수일자 : 1999. 8. 13)