플라이애쉬 콘크리트의 강도 및 역학적 특성에 관한 연구

A Study on the Strength and Mechanical Characteristics of Normal and High-Strength Fly-Ash Concretes

吳 炳 煥* 高 在 君**
Oh, Byung Hwan Koh, Chae Koon

요 약

본 연구에서는 새로운 건설소재로서 플라이애쉬 콘크리트를 효율적으로 이용하기 위하여 플라이애쉬 콘크리트의 배합특성에 따른 강도 및 역학적특성에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 포괄적인 실험연구를 수행하였으며, 보통강도 및 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 특성연구를 수행하였다. 본 연구에서는 플라이애쉬의 혼입량을 0%에서 30%까지 변화시키면서 플라이애쉬의 혼입효과를 규명하였고, 각 재령별 강도증진률을 도출하였다. 본 연구결과로부터 소요강도를 얻기 위해 요구되는 물-시멘트비와 플라이애쉬의 최적혼입량을 도출하였다. 본 연구에서는 또한 플라이애쉬 콘크리트의 휨강도, 할열인장강도 및 탄성계수 예측공식을 도출하여 제시하였다.

Abstract

Presented is a study on the strength and mechanical characteristics of various fly-ash concrete mixes. To this end, a comprehensive experimental study was conducted for normal and high-strength fly-ash concretes. The fly-ash contents were varied from 0% to 30% of cement weight to explore the effects of fly-ash addition. The optimum fly-ash amounts required to obtain the desired strengths were established from the present study. The prediction equations for the flexural strength, splitting tensile strength and elastic modulus of fly-ash concrete were also proposed.

1. 서론

플라이애쉬는 석탄을 원료로 하는 화력발전소에서 석탄(무연탄, 유연탄)이 연소된 후, 구형의 미세한 분말형태로 남게되는 부산물이다.

현재 화력발전소에서는 1970년대 석유파동이래 석탄의 이용기술 발달로 석유대체 에너지로 주목을 받게 되었으나 석탄의 소비량이 증대됨에 따라 석탄재의 처리등 환경상의 문제점이 제기되고 있다.

종래에는 석탄재를 공지매립 등에 이용하여 왔으나

* 정회원 · 서울대학교 토목공학과 교수
** 정회원 · 서울대학교 농공학과 교수

이러한 이용이 점차로 어렵게 되자 선진국에서는 1950년대부터 석탄재 처리대책의 일환으로 자원의 재활용화 기술에 대한 연구개발이 활발히 진행되어 왔으며, 이 결과로 플라이애쉬(fly-ash)를 콘크리트에 이용함으써 콘크리트의 성질을 개선함과 동시에 산업부산물을 효율적으로 이용할 수 있는 가능성을 제시하게 되었다.

플라이애쉬 콘크리트는 보통콘크리트에 비해서 경제성이 높으며 콘크리트의 역학적 성질도 개선하는 장점을 가지고 있다. 우리나라에서는 보령 및 삼천포 화력발전소가 가동된 1980년대 이전에는 석탄재의 거의 전량이 대체재료로서의 경제적 시공 및 산업폐기물의 재활용이라는 관점에서 일부 레미콘 회사가 원가절감의 목적으로 양질의 플라이애쉬를 선별하여 일부 사용하고 있는 것으로 나타나고 있다.

그러나 플라이애쉬를 사용함으로써 변화되는 콘크리트의 제반성질은 복잡하여 콘크리트의 유동성, 물-시멘트비, 혼화재료의 첨가량 등에 따라서 많은 변화를 초래하게 된다. 따라서 플라이애쉬 첨가에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 명확히 규명하는 것이 필요하다.

본 논문의 목적은 새로운 건설소재로서 플라이애쉬 콘크리트(fly-ash concrete)를 효율적으로 이용하기 위하여 플라이애쉬 콘크리트의 배합특성을 규명하고, 플라이애쉬 혼입에 따른 강도 및 역학적 특성을 규명하며, 특히 앞으로 효율적이고 활발한 이용이 기대되고 있는 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 제조 및 강도특성을 규명하는데 그 주목적을 두고 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 포괄적인 실험을 수행하였다.

2. 플라이애쉬 콘크리트의 強度 및 力學的 特性 實驗

2.1 실험의 概要

본 연구에서는 플라이애쉬 콘크리트제조에 있어서 시멘트 대체재료로서의 混和材(fly-ash)를 10, 20, 30%로 변화시켰고 각 비율에 대하여 基準콘크리트로 混和材를 첨가하지 않은 경우를 추가하였다.

다음으로 강도발현에 큰 영향을 미치는 변수인 W/C비를 0.28, 0.34, 0.40으로 두어 비교적 낮은 W/C비로 범위를 제한하였으며, 단위시멘트량은 450 및 550kg/㎥로서 고강도 발현중에 중점을 두었다.

낮은 W/C비와 混和材의 첨가 및 단위시멘트량에 따른 유동성의 악화를 방지하고 굳지 않은 콘크리트의 打設과 다짐이 용이하여야 하며 材料분리가 적고 마무리 作業을 쉽게 하기 위하여 혼화제로서 고성능 감수제인 Mighty 150을 첨가하였다.

또 일반건설에 손쉽게 적용하고자 제1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 재령변수를 3, 7, 28일로 설정하였고, 플라이애쉬 콘크리트의 특징인 장기강도 증진효과를 고찰하기 위하여 90일 강도를 추가 실험하였다. 실험 시편의 분류기호와 배합설계는 표1과 같다.

표1. 각 시리즈별 배합설계 내용

시편 기호	시멘트 (kg/㎥)	Fly Ash (kg/㎥)	물 (kg/㎥)	모래 (kg/㎥)	자갈 (kg/㎥)	고유동 화제(%)	Slump (cm)
A 0	540	0	126	753.8	1126.5	1.7	
A10	405	45	126	747.6	1117.1	1.8	
A20	360	90	126	741.3	1107.8	1.85	14±1
A30	315	135	126	735.1	1098.4	2.0	
HA 0	550	0	154	690.5	1031.8	1.6	
HA10	495	55	154	682.8	1020.4	1.8	
HA20	440	110	154	675.2	1009.0	1.8	
HA30	385	165	154	667.6	997.6	1.9	
B 0	450	0	153	725.2	1083.7	1.2	
B10	405	45	153	718.9	1074.3	1.5	
B20	360	90	153	712.7	1065.0	1.4	18±1
B30	315	135	153	706.4	1055.7	1.6	
HB 0	550	0	187	655.5	979.5	1.0	
HB10	495	55	187	647.9	968.1	1.0	
HB20	440	110	187	640.2	956.7	1.1	
HB30	385	165	187	632.6	945.3	1.2	
C 0	450	0	180	696.6	1040.9	0.9	
C10	405	45	180	690.3	1031.6	0.9	
C20	360	90	180	684.1	1022.2	1.0	18±1
C30	315	135	180	677.8	1012.9	1.0	
HC 0	550	0	220	620.5	927.3	0.3	
HC10	495	55	220	612.9	915.9	0.4	
HC20	440	110	220	605.2	904.4	0.4	
HC30	385	165	220	597.6	893.0	0.5	

[주] (1) 고유동화제 : Mighty 150(시멘트 중량비%)
(2) A 및 HA : W/C=0.28, B 및 HB : W/C=0.34, C 및 HC : W/C=0.40

2.2 實驗 材料

(1) 시멘트

一般的으로 플라이애쉬의 시멘트 代替效果 및 長期

強度 增進效果를 건설현장에 광범위하게 적용하기 위하여 국산 제1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

(2) 骨材

잔골재는 비중 2.65, 粗粒率은 2.19인 강모래를, 굵은 골재는 비중 2.65, 조립률은 7.15, 최대치수 15㎜인 강자갈 碎石을 사용하였다.

(3) 混和材(플라이애쉬)

플라이애쉬는 석탄을 연료로 하는 火力發電所에서 微粉炭을 약 1,400~1,500℃의 고열로 연소시켰을 때 炭粉이 熔融되어 고온의 연소 gas와 더불어 이를 급격히 냉각시키면 表面張力에 의해 球形으로 생성되는 미세한 粉末이다.

또한 플라이애쉬는 포졸란 반응이 극히 크며 입자의 비표면적이 시멘트와 거의 비슷하여 시멘트 대체재료, 장기강도 확보, 내구성 증진 및 수화열 감소 등에 좋은 재료로 알려져 있다.

본 연구에서는 비중 2.23 粉末度 3,190㎠/g인 보령화력발전소산 유연탄 플라이애쉬를 사용하였다.

(4) 混和材

낮은 W/C비와 混和材의 첨가로 낮아지는 유동성을 확보하기 위하여 Sulfonated Napthalene계의 고성능 감수제 Mighty 150을 사용하였다. 이러한 고성능 감수제를 사용하여 W/C=0.34, 0.40의 경우에는 Slump를 18±1(cm), W/C=0.28에서는 14±1(cm)를 얻도록 하였다.

본 실험에서는 W/C비가 일정할때 플라이애쉬의 첨가량이 많아질수록 고성능 감수제의 필요량이 거의일정하게 증가함을 알 수 있었다.

2.3 實驗方法

본 실험에서는 플라이애쉬 콘크리트를 만들기 위하여, 먼저 잔골재 및 굵은골재를 혼합믹서에 투입하여 2분간 섞은 후, 시멘트를 투입하여 다시 2분간 혼합하고, 최종적으로 혼화제를 첨가한 물을 투입하여 3분간 혼합하였다. Slump Test는 매 Batch마다 실험하였고, 3층 다짐후 진동다짐을 수행하여 24시간 후 脫型하여 23±1℃에서 水中養生하였다.

各材令別로 공시체를 캡핑하여 자동제어 재료시험기로 압축강도, 할열인장강도, 휨강도 및 응력-변형도 관계를 측정하였다.

3. 實驗結果 및 理論的 分析

3.1 재령에 따른 강도증진 효과

저렴한 대체재료서의 성격이 강한 플라이애쉬는 강도증진의 側面은 미약한 것으로 알려져 있다. 그러나, 장기강도의 改善效果는 많이 보고되었으며, 플라이애쉬의 가장 큰 특징으로 알려져 있다. 따라서 재령에 따른 강도증진 효과는 플라이애쉬 콘크리트의 특성을 규명하는 중요한 요소가 된다. 본 실험에서 수행된 플라이애쉬 콘크리트의 압축강도 실험결과가 표2에 기록되어 있다. 이표에서 보는 바와같이 플라이애쉬 콘크리트는 28일 이후에도 압축강도가 크게 증가하고 있으며, 시멘트량 450kg/㎥일때 압축강도 600kg/㎠, 그리고 시멘트량 550kg/㎥일때 740kg/㎠의 고강도 콘크리트를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

표3은 재령 28일을 기준으로 한 각 재령별 압축강도 증진률을 나타내고 있으며, 플라이애쉬를 혼입할 경우 재령 28일 이후 90일에서 약 45%의 강도 증진률을 나타내고 있다. 표4는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 기준 콘크리트의 강도를 1로 하였을때 플라이애쉬 혼입에 따른 강도발현 상태를 나타내고 있다. 초기에는 플라이애쉬를 혼입한 경우가 혼입하지 않은 경우에 비하여 약 60 ~70%의 강도발현을 보이지만, 90일에서는 기준콘크리트의 강도를 상회하고 있다.

이는 ACI Committee 226에서 밝힌, 플라이애쉬가 포졸란 반응을 일으켜 콘크리트의 장기강도에 기여한다는 理論과 일치함을 알 수 있다.

플라이애쉬中 포졸란 반응을 일으키는 成分은 가용성 실리카(SiO_2)와 알루미나(Al_2O_3)라고 알려지고 있다. 플라이애쉬를 시멘트에 혼합할 경우, 시멘트의 수화에 의해 발생되는 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)의 칼슘이온(Ca^2)과 플라이애쉬에서 溶出되는 SiO_3^2나 $Al_2O_4^2$가 반응하여 칼슘실리케이트 水化物(CSH)이나 칼슘알루미네이트 水化物(CAH)을 생성하고 장시간에 걸쳐 固化되어 강도를 발현한다. 플라이애쉬 시멘트 페이스트의 28일에서 90일 사이의 X-ray 回析分析을 관찰해 보면 $Ca(OH)_2$의 최고치가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 시멘트가 水化反應 結果 形成된 $Ca(OH)_2$

표2. 각 시리즈 플라이애쉬 콘크리트의 압축강도 실험 결과

(단위 : MPa)

시편기호	3 일	7 일	28 일	90 일
A 0	32.6	39.3	51.0	58.6
A10	24.8	31.1	47.9	59.0
A20	20.6	30.4	43.4	60.4
A30	18.2	28.7	39.1	56.0
HA 0	38.6	54.4	61.7	70.9
HA10	32.6	44.1	54.9	71.6
HA20	31.1	37.2	53.0	73.9
HA30	25.3	32.2	50.6	71.3
B 0	22.6	29.5	41.1	47.7
B10	18.9	21.9	38.2	49.7
B20	18.7	21.5	34.8	47.8
B30	17.5	19.7	31.4	45.8
HB 0	34.2	48.0	56.2	62.9
HB10	27.0	43.1	53.3	63.4
HB20	25.5	37.6	50.0	63.4
HB30	22.6	29.2	45.1	59.5
C 0	21.8	28.3	40.1	46.9
C10	18.0	21.2	36.8	48.8
C20	15.2	22.4	34.1	47.1
C30	14.2	17.5	29.3	39.3
HC 0	25.2	31.7	46.9	54.6
HC10	22.7	30.9	41.1	56.9
HC20	21.5	23.8	38.7	55.0
HC30	20.1	23.4	35.3	50.2

가 플라이애쉬와 결합 작용한다는 것을 단적으로 말해 주고 있는 것이다.

그림1은 단위시멘트량이 450kg/㎥이고 W/C비가 0.28인 경우의 플라이애쉬 혼입량에 따른 재령별 강도증진효과를 대수축적(logarithmic scale)으로 그린 것이다. 이 그림에서 보듯이 강도증진은 재령에 따라 대수축적으로 선형의 관계에 있음을 알 수 있다. 또한, 그림2는 단위시멘트량이 550kg/㎥인 경우로서 W/C비도 그림1과 같이 0.28인 경우이다. 이들 그림1과 그림2에서 공통적으로 확인할 수 있는 중요한 사항은 플라이애쉬가 혼입되지 않은 기준 콘크리트에서는 재령 28일까지의 강도증진 곡선(점선)의 기울기가 큰데 반하여, 플라이애쉬가 혼입된 콘크리트에서는 90일까지의 강도증진 곡선(실선)의 기울기가 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 플라이애쉬 콘크리트의 강도 증진률이 28일 이후에도 더 큰 것을 말해 주고 있다.

그림3은 Series-A 콘크리트로서 단위시멘트량 450kg/㎥인 경우의 플라이애쉬 함량별 재령에 따른

표3. 28일을 기준으로 한 材令別 압축강도 增進率

시편기호	3 일	7 일	28 일	90 일
A 0	0.64	0.77	1.00	1.15
A10	0.52	0.65	1.00	1.23
A20	0.47	0.70	1.00	1.39
A30	0.47	0.73	1.00	1.43
HA 0	0.63	0.88	1.00	1.15
HA10	0.59	0.70	1.00	1.30
HA20	0.59	0.70	1.00	1.39
HA30	0.50	0.64	1.00	1.41
B 0	0.55	0.72	1.00	1.16
B10	0.49	0.57	1.00	1.37
B20	0.54	0.62	1.00	1.37
B30	0.56	0.63	1.00	1.46
HB 0	0.61	0.85	1.00	1.12
HB10	0.51	0.81	1.00	1.19
HB20	0.51	0.75	1.00	1.27
HB30	0.50	0.65	1.00	1.32
C 0	0.54	0.71	1.00	1.17
C10	0.49	0.58	1.00	1.38
C20	0.45	0.66	1.00	1.34
C30	0.48	0.60	1.00	1.34
HC 0	0.54	0.68	1.00	1.16
HC10	0.55	0.75	1.00	1.38
HC20	0.56	0.61	1.00	1.42
HC30	0.57	0.66	1.00	1.42

강도증진 양상을 나타내고 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트가 초기강도는 떠어지나 90일 강도에서 상회하고 있음을 알 수 있다. 그림4는 Series-HA 콘크리트로서 단위시멘트량 550kg/㎥인 경우의 플라이애쉬 함량별 재령에 따른 강도증진 양상을 나타내고 있다.

그림5와 그림6은 물-시멘트 W/C=0.34인 경우로서 단위시멘트량이 각각 450, 550kg/㎥인 경우의 플라이애쉬 함량별 강도증진률을 나타내고 있다. 또한 그림7과 그림8은 W/C=0.4인 경우의 각각의 단위시멘트량에서의 강도 증진률을 나타내고 있다.

3.2 플라이애쉬 함량변화에 따른 강도증진 및 시멘트 대체효과

본 연구에서 얻어진 결과를 플라이애쉬 함량에 따른 재령별 그리고 물-시멘트비별 압축강도를 도시하면 그림9와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 재령 28일 강도까지는 플라이애쉬를 혼입하

표4. 플라이애쉬 含量別 압축강도 增進率

시편기호	3 일	7 일	28 일	90 일
A 0	1.00	1.00	1.00	1.00
A10	0.76	0.79	0.94	1.01
A20	0.63	0.77	0.85	1.03
A30	0.56	0.73	0.77	0.96
HA 0	1.00	1.00	1.00	1.00
HA10	0.84	0.81	0.89	1.01
HA20	0.81	0.68	0.86	1.04
HA30	0.65	0.59	0.82	1.01
B 0	1.00	1.00	1.00	1.00
B10	0.79	0.74	0.93	1.04
B20	0.75	0.73	0.85	1.00
B30	0.66	0.67	0.76	0.96
HB 0	1.00	1.00	1.00	1.00
HB10	0.83	0.90	0.95	1.01
HB20	0.70	0.78	0.89	1.01
HB30	0.65	0.61	0.80	0.95
C 0	1.00	1.00	1.00	1.00
C10	0.83	0.75	0.92	1.04
C20	0.70	0.79	0.85	1.01
C30	0.65	0.62	0.73	0.84
HC 0	1.00	1.00	1.00	1.00
HC10	0.90	0.97	0.88	1.04
HC20	0.85	0.75	0.83	1.01
HC30	0.80	0.74	0.75	0.92

지 않은 기준콘크리트의 강도가 크나 재령 90일에서는 플라이애쉬를 혼입한 경우가 오히려 기준콘크리트의 강도를 상회하고 있음을 할 수 있다.

3.3 휨강도 및 할열인장강도 특성

본 연구에서는 각 시리즈마다 휨강도 및 할열인장강도를 측정하였으며, 이를 압축강도 ($\sqrt{fc'}$) 의 함수로 그린 것이 그림10이다. 이 그림에서 보듯이 휨강도 및 할열인장강도는 압축강도의 제곱근 $\sqrt{fc'}$에 비례하고 있으며 그값이 Nilson의 실험식보다 약간 큰 값을 보이고 있다. 본 연구에서 얻어진 예측공식은 다음과 같다.

휨강도 $fr'=1.0\sqrt{fc'}$ (MPa) (1)

할열인장강도 $f'_{sp}=0.66\sqrt{fc'}$ (MPa) (2)

3.4 탄성계수 특성

본 연구에서는 플라이애쉬 콘크리트의 탄성계수도 측정하였으며 이 결과가 그림11에 도시되어

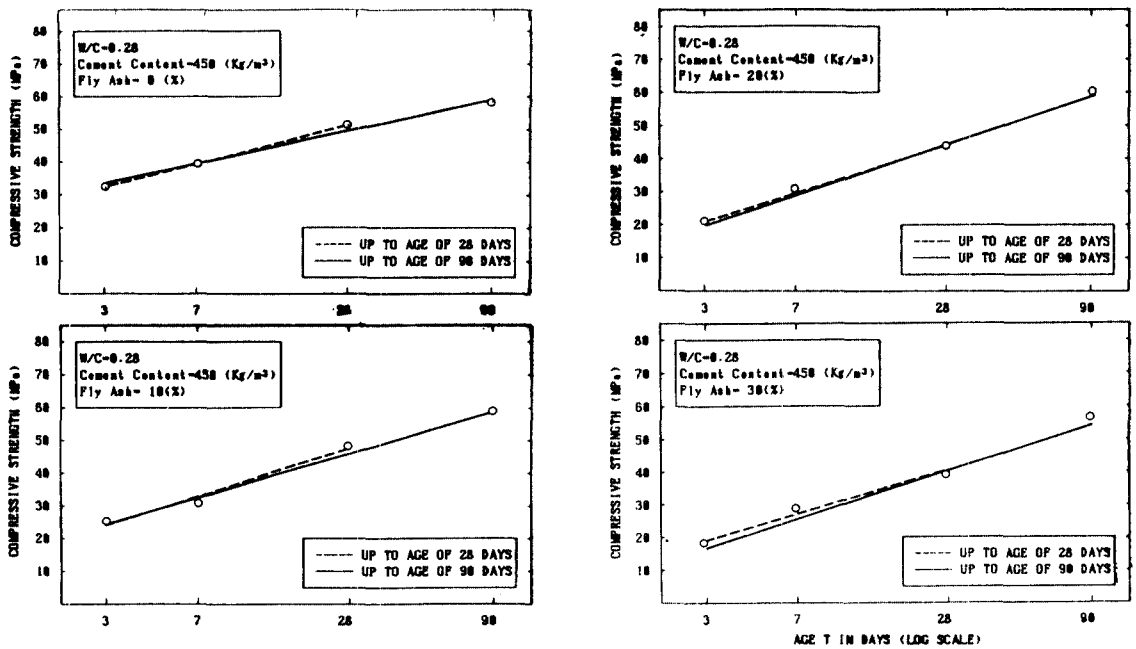
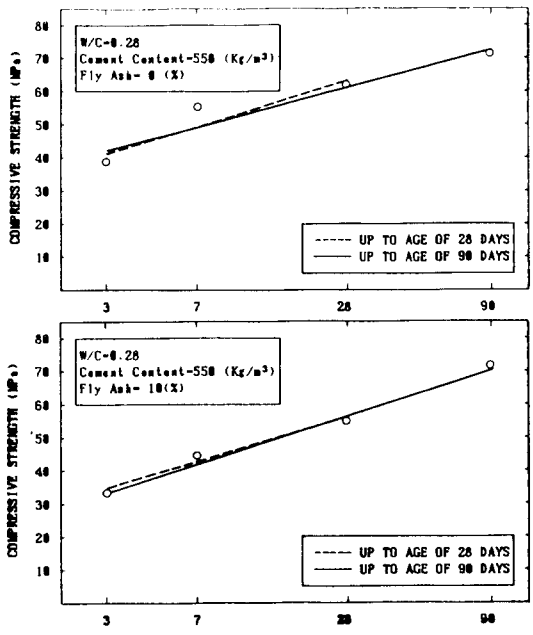


그림 1. Series-A 콘크리트의 재령별 강도증진률



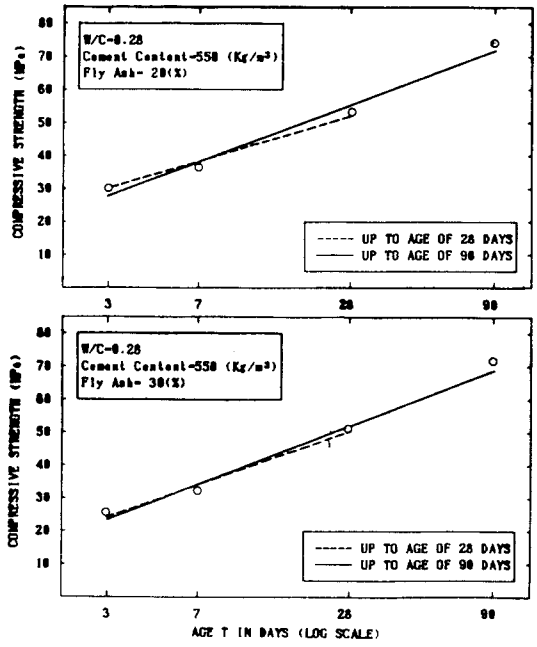


그림2. Series-HA 콘크리트의 재령별 강도증진률

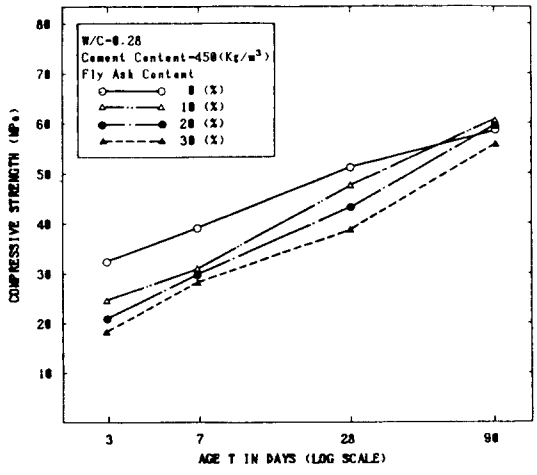


그림3. Series-A 콘크리트의 플라이애쉬 함량별 강도증진

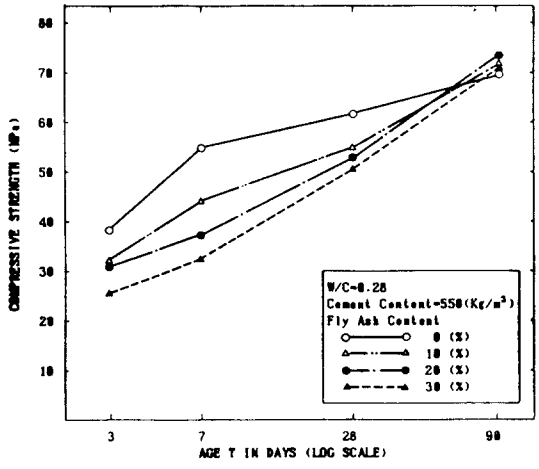


그림4. Series-HA 콘크리트의 플라이애쉬 함량별 강도증진

있다. 이 그림에서는 ACI 설계기준에 의한 식과 최근에 제시된 Nilson의 식도 함께 비교하고 있는데, 본 연구에서 제안된 예측공식이 두 예측공식의 중간에 위치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 30MPa이하의 압축강도에서는 Nilson공식과 유사하며, 압축강도 30에서 70MPa사이에서는 본 연구결과가 Nilson결과보다 약간 큰 값을 보여주고 있다. 본 연구에서 얻어진 탄성계수 예측공식은 다음과 같다.

$$E=3647\sqrt{fc'}+5442 \quad (MPa) \qquad (3)$$

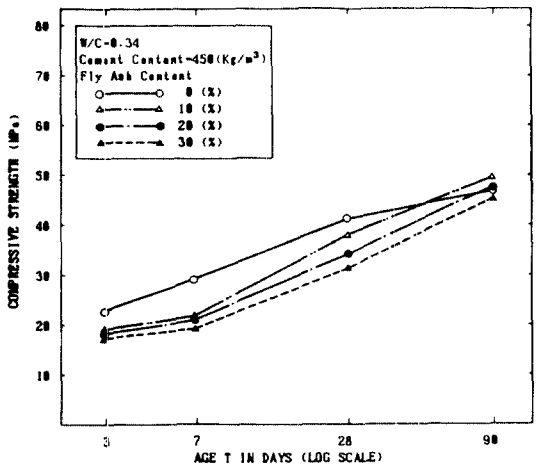


그림5. Series-B 콘크리트의 플라이애쉬 함량별 강도증진

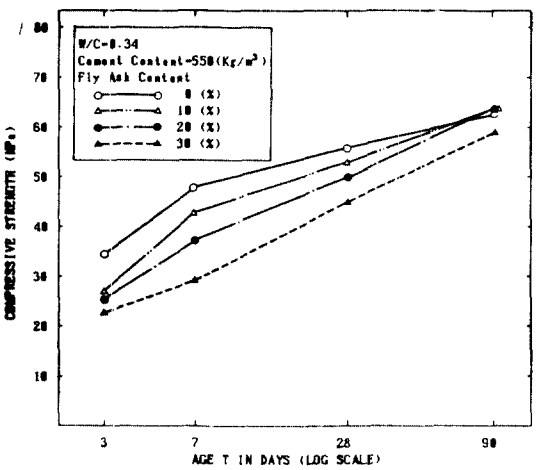


그림6. Series-HB 콘크리트의 플라이애쉬 함량별 강도증진

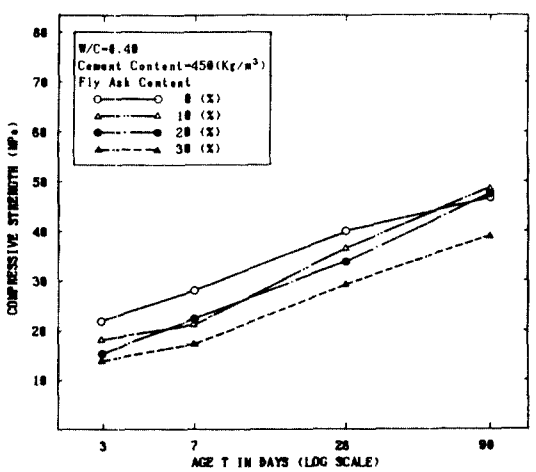


그림7. Series-C 콘크리트의 플라이애쉬 함량별 강도증진

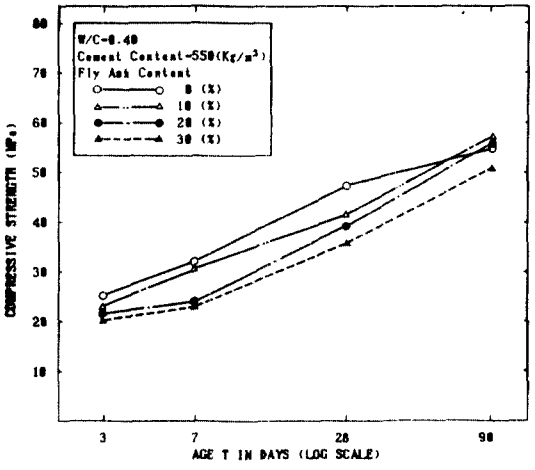
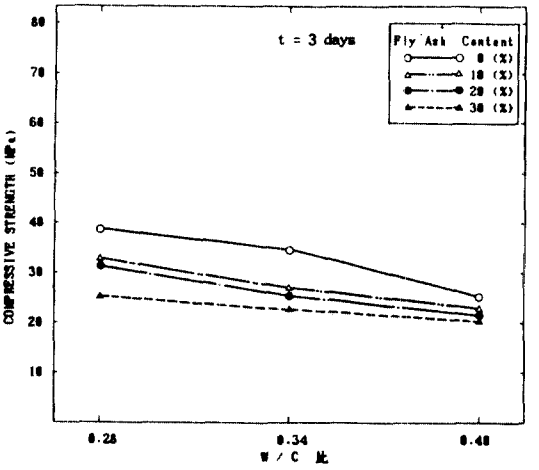


그림8. Series-HC 콘크리트의 플라이애쉬 함량별 강도증진



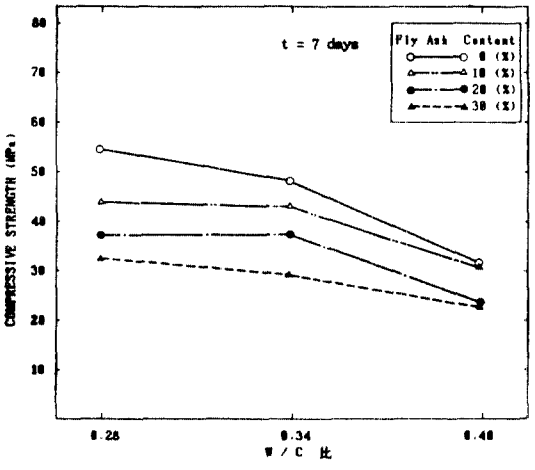


그림9. 플라이애쉬 함량에 따른 재령별 압축강도(Series H 콘크리트)(계속)

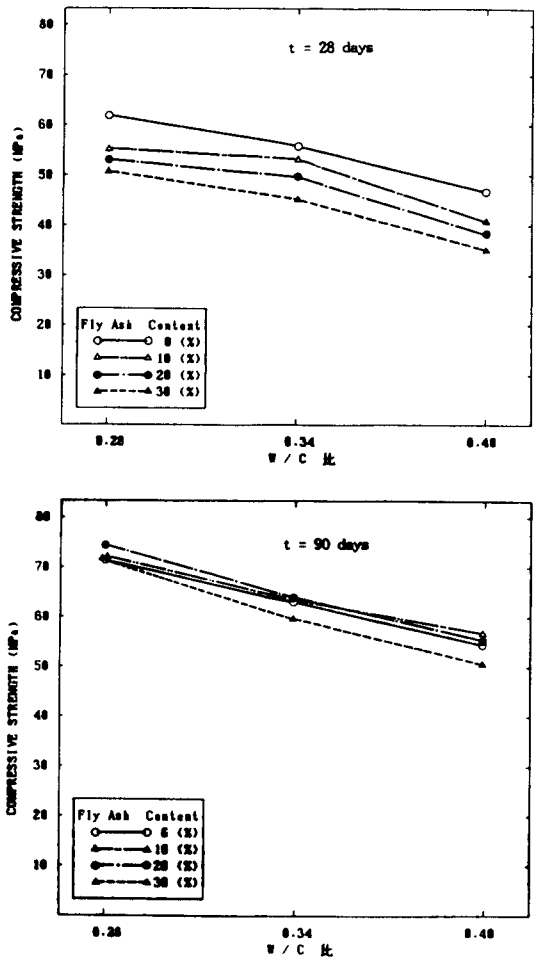


그림9. 플라이애쉬 함량에 따른 재령별 압축강도(Series H 콘크리트)

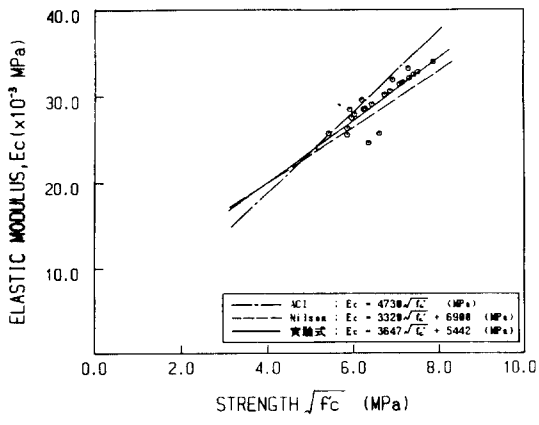


그림11. 탄성계수와 압축강도와의 관계

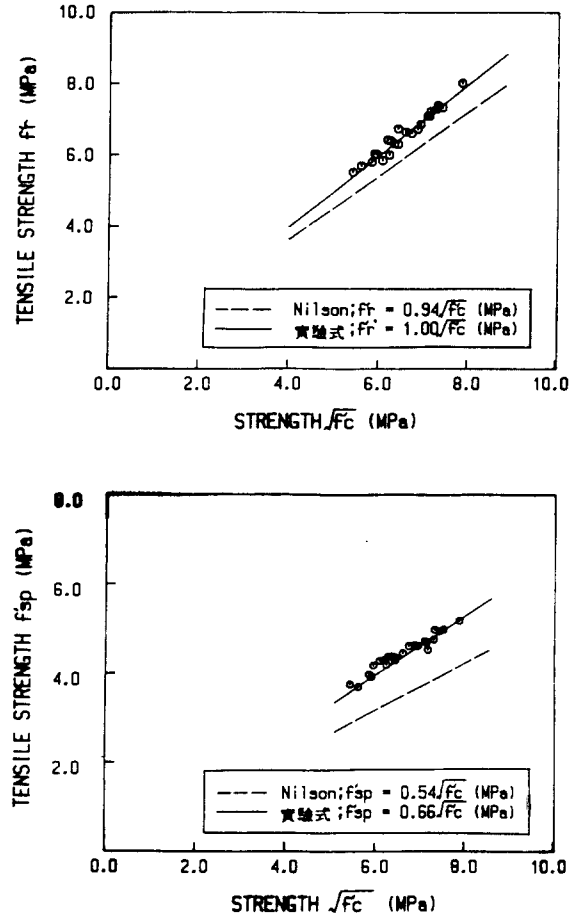


그림10. 휨강도 및 할열인장강도와 압축강도의 관계

4. 결론

본 연구에서는 새로운 건설소재로서 플라이애쉬 콘크리트를 효율적으로 이용하기 위하여 플라이애쉬 콘크리트의 배합특성에 따른 강도 및 역학적 특성을 규명하고자 하였다. 특히 앞으로 활발한 이용이 기대되고 있는 고강도 플라이애쉬 콘크리트의제조 및 강도특성을 규명하는데 주안점을 두었다. 이를 위하여 본 연구에서는 포괄적인 실험을 수행하였다.

본 연구결과 플라이애쉬를 혼입하므로서 장기강도가 크게 증가하였고, 일반 기준콘크리트는 90일 강도가 28일 강도보다 약 15%정도 증가한 반면 플라이애쉬 콘크리트는 약 45%까지 크게 증하

였다. 또한 재령 초기에는 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 강도가 플라이애쉬를 혼입하지 않은 기준콘크리트 강도의 약 60~70%정도의 강도발현을 보이지만 90일에서는 기준콘크리트 강도보다도 더 높은 강도발현을 보이고 있다.

본 연구에서는 또한 소요강도를 얻기위해 요구되는 물-시멘트비와 플라이애쉬의 최적 혼입량을 본 실험결과로부터 도출하였으며, 이것은 최적배합을 얻는데 유효한 자료가 된다. 아울러 본 연구에서는 플라이애쉬 콘크리트의 휨강도와 할열인장강도 특성을 규명하였으며, 탄성계수에 대한 예측공식을 유도하여 제시하였다.

謝 辭

본 연구는 1989년도 학술진흥재단의 자유공모과제에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 226, "Use of Fly ash in Concrete", Committee Report, 1985.
2. Adrian, P., "Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density", Aci Journal, Vol. 57, No. 6, Dec. 1960.
3. Aitcin, P.C., "Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes", ACI SP91-4, 1986.
4. Anderson, F.D., "Statistical Controls for High Strength Concrete", ACI SP-87, 1985.
5. Branson, E., "Deformation of Concrete Structures", McGraw Hill, 1977.
6. Carrasquillo, R.L., "High-Strength Concrete : An Annotated Bibliography 1930-1979", Cement, Concrete and Aggregate, ASTM, Vol. 2, No. 1, Summer 1980.
7. Cuijuan, S., "Concrete Made with Calcium-Enriched Fly Ash", ACI SP 91-18, 1986.
8. Gebler, S.H., "Effect of Fly Ash on Physical Properties of Concrete", ACI SP-91, 1986.
9. Ghosh, R.S., "Proportioning Concrete Mixes Incorporating Fly Ash", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 3, 1976.
10. Hague, M.N., "High Strength Fly Ash Concretes", ACI Journal, Jan-Feb, 1984.
11. Montgomery, D.G., "Fly Ash in Concrete-A Microstructure Study", Cement and Concrete Research, 1984.
12. Nilson, A.H., "Properties of High Strength Concrete Subject to Short Term Loading", ACI Journal, Vol. 78, No.3, May-Aug. 1981
12. Nilson, A.H., "Microcraking and Time-Dependant Strains in High Strength Concrete", ACI Journal, Vol. 78, No.4, July-Aug. 1981
14. Nilson, A.H., "Microcraking and Behavior of High Strength Cocrete Subject to Short Term Loading", ACI Journal, Vol.78, No.4, May-June 1981.
15. Popovics, S., "What Do We Know about the Contribution of Fly Ash to the Strength of Concrete?", ACI SP-91, 1986.
16. Swamy, R.N., "Early Strength Fly Ash Concrete for Structural Applications", ACI Journal, Sep-Oct. 1983.
17. Swamy, R.N., "Mix Proportions and Strength Characteristics of Cocrete Containing 50 Percent Low-Calcium Fly Ash", ACI SP 91-18, 1986.

(접수일자 : 1991. 2. 10)