플라이애쉬를 混合한 콘크리트의 配合 및 强度特性에 관한 硏究

A Study on the Mix Proportioning and Strength Properties of Concrete Mixtures Containing Flyash

文 翰 英*
Moon, Han Young
徐 政 佑**
Seo, Joung Woo
孫 亨 虎***
Son, Hyung Ho

Abstract

In this paper, three kinds of proportioning method on concrete mixes containing fly ash as an admixture were compared and investigated.

As the test results for relationships between substitution ratio of fly ash, water-binder ratio, ages and strength besides the proportioning methods and workability of fresh concrete beneficial reference data to estimate quality of domestic fly ash were atained.

要 旨

국산 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 혼합률, 물결합재비와 재령과 강도와의 관계 및 워커빌리티에 대하여 실험을 통하여 검토하였다. 아울러 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 배합방법 3종류에 대해서도 비교 고찰한 결과, 국산 플라이애쉬의 품질을 평가하는데 유익한 참고자료를 얻었다.

1. 서 론

양질의 플라이애쉬는 굳지않은 콘크리트의 워커빌리티를 개선하고 水和發熱量을 저하시킬 뿐만 아니라 경화한 콘크리트의 장기강도, 水密性 및 化學抵抗性등의 개선에 우수한 점을 인정받아 댐 및 매스콘크리를 위시한 각종 콘크리트에 널리 보급되고 있다[1~14]. 반면에 플라이애쉬는 주로 火力發電所에서 발생하는 산업부산물이므로 原炭의 품질 등의 변화에 따른 콘크리트의 품질변동이 큰 점, 플라이애쉬의 혼합률에 따라 강도발현이 지연되는 점 및 AE제가 미연소탄소에 흡착되어 소요의 공기량을 확보하기 어려운 점 등이 문제점으로 지적되고 있다[15~18]. 그래서 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 早期强度

* 正會員·漢陽大學校 工科大學 敎授, 土木工學科
** 正會員· 〃 博士課程 修了
*** 正會員· 〃 碩士課程 〃

改善을 위한 配合設計法이 제안되고 있으며[19~26] ACI-211 에서는 포졸란을 혼합한 매스콘크리트의 배합방법을 개선하기 위한 수정배합설계 방법이 소개된 바 있다[2,5].

본 연구에서는 플라이애쉬를 콘크리트용 혼화재로 사용한 배합설계방법 3 종류에 대하여 각각 실험을 통하여 검토하였다. 또한 플라이애쉬의 포졸란 반응성을 나타내기 위하여 제안된 Ferét 계수와 압축강도와의 관계 및 동일한 물결합재비에서 플라이애쉬를 5 단계로 혼합한 콘크리트의 워커빌리티 및 강도실험결과에 대해서도 고찰하였다.

2. 실험개요

2-1. 사용재료

(1) 시멘트 및 플라이애쉬 : 화학성분 및 물리적 성질은 표-1 과 같다.

(2) 골재 : 한강산 모래와 자갈로써 물리적 성질은 표-2 와 같다.

2-2. 실험방법

(1) 워키빌리티 측정 : KS F 2402 에 의한 슬럼프 시험을 실시하였다.

(2) 강도 및 탄성계수 측정 : 압축 및 인장강도는 $\phi 10 \times 20$cm 원주형 공시체를 수중에서 표준양생하여 각 재령별로 측정하였으며, 탄성계수는 콤프레소미터를 사용하여 구하였다.

2-3. 콘크리트의 배합

플라이애쉬 혼합률 0, 10, 20, 30 및 40%의 5단계, 물결합재비 45, 50, 55 및 60%에 대한 20 종류의 콘크리트 배합을 정한 것이 표-3 이다. 이때 플라이애쉬와 시멘트의 비중차이 때문에 결합재(C+F)의 용적이 증가되는 만큼 잔골재율을 줄여 주었다. 그리고 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 대표적인 배합방법 3 종류에 대하여 실험을 실시하였다.

첫째 : 플라이애쉬를 혼화재로 시멘트에 혼합하는 혼합방법으로서 표-4 의 No. 1~No. 5 배합이며,

둘째 : 시멘트 중량에 대하여 플라이애쉬를 중량치환하는 방법으로써 플라이애쉬로 시멘트의 일부를 치환하고 잔골재나 잔골재와 굵은골재의 일부도 치환하는 시멘트골재 치환방법으로써 표-4 의 No. 6~No. 13 배합이며,

셋째 : 단위시멘트량을 고정시키고 시멘트 중량의 10, 20, 30 및 50%에 해당하는 플라이애쉬를 별도로 첨가하여 사용하는 첨가방법으로서 표-4 의 No. 14~No. 17 배합을 말한다.

3. 실험결과에 대한 고찰

3-1. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 위커빌리티에 대한 고찰

일반적인 혼합방법에 의해 플라이애쉬를 콘크리트에 혼합했을 때, 플라이애쉬의 혼합률과 콘크리트의 슬럼프와의 관계를 물결합재비 별로 나타낸 것이 그림-1 이다. 이 그림에서 4 개의 곡선이 다같이 플라이애쉬의 혼합비율이 증가하는데 따라 동일한 단위수량임에도 불구하고 슬럼프값이 약간씩 증가됨을 알 수 있다. 이러한 경

표-1. 시멘트와 플라이애쉬의 화학성분 및 물리적 성질

구분 \ 분석값	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	Ig. loss (%)	Total Alkalies (%)	체잔류량(%) 88μ	체잔류량(%) 44μ	비 중	Blaine's 값 (cm^2/g)
시멘트	21.8	5.84	3.56	60.62	3.54	2.58	—	—	0.95	—	—	—	3.15	3,422
플라이애쉬	66.65	22.78	1.92	1.61	0.87	Tr.	0.03	0.21	5.35	0.17	0.6	2.5	2.17	5,758

표-2. 골재의 물리적 성질

종류 \ 항목	굵은골재 최대치수 (mm)	비 중	흡수율 (%)	조립률 (F.M.)	유기불순물	단위용적중량 (kg/m^3)	실적률 (%)
잔 골 재	—	2.60	0.97	2.28	양호	1,678	63.8
굵 은 골 재	25	2.64	0.91	7.24	—	1,744	66.3

표-3. 콘크리트의 배합(1)

No.	G_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C+F (%)	S/a (%)	F/(C+F) (%)	단 위 량(kg/m³)				
							C	W	S	G	F
1	25	0.4	2.0	45	37	0	350	157.5	684	1,183	0
2	〃	2.0	〃	〃	35	10	315	〃	643	1,212	35
3	〃	3.0	〃	〃	33	20	280	〃	602	1,241	70
4	〃	5.1	〃	〃	29	30	245	〃	525	1,306	105
5	〃	—	〃	〃	29	40	210	〃	521	1,296	140
6	25	7.5	2.0	50	37	0	350	175	668	1,154	0
7	〃	7.5	〃	〃	35	10	315	〃	627	1,182	35
8	〃	9.7	〃	〃	33	20	280	〃	587	1,210	70
9	〃	13.6	〃	〃	29	30	245	〃	512	1,273	105
10	〃	—	〃	〃	29	40	210	〃	568	1,263	140
11	25	12.0	2.0	55	37	0	350	192.5	651	1,125	0
12	〃	17.5	〃	〃	35	10	315	〃	611	1,152	35
13	〃	19.2	〃	〃	33	20	280	〃	572	1,179	70
14	〃	19.1	〃	〃	31	30	245	〃	533	1,205	105
15	〃	—	〃	〃	31	40	210	〃	529	1,196	140
16	25	20.4	2.0	60	37	0	350	210	634	1,096	0
17	〃	21.0	〃	〃	35	10	315	〃	595	1,122	35
18	〃	22.0	〃	〃	33	20	280	〃	557	1,148	70
19	〃	22.5	〃	〃	31	30	245	〃	519	1,173	105
20	〃	—	〃	〃	31	40	210	〃	515	1,164	140

표-4. 콘크리트의 배합(2)

No.	G_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	S/a (%)	W/C+F (%)	단 위 량(kg/m³)					비고
						C	W	S	G	F	
1	25	12±1	2.0	38	45.0	400	180	669	1,108	0	
2	〃	〃	〃	〃	44.5	360	178	667	1,105	40	
3	〃	〃	〃	〃	45.8	320	183	656	1,087	80	혼합 방법
4	〃	〃	〃	〃	46.8	220	187	647	1,071	120	
5	〃	〃	〃	〃	48.8	200	195	628	1,040	200	
6	25	12±1	2.0	38	45.2	360	190	637	1,093	60	
7	〃	〃	〃	〃	43.6	320	192	615	1,097	120	
8	〃	〃	〃	〃	44.3	280	204	563	1,052	180	
9	〃	〃	〃	〃	47.4	200	237	473	980	300	중량 치환 방법
10	25	12±1	2.0	38	43.2	360	190	676	1,106	80	
11	〃	〃	〃	〃	41.7	320	200	550	1,067	160	
12	〃	〃	〃	〃	42.3	280	220	477	1,025	240	
13	〃	〃	〃	〃	46.7	200	280	312	909	400	
14	25	12±1	2.0	38	43.2	400	190	600	1,072	40	
15	〃	〃	〃	〃	40.0	〃	192	568	1,098	80	첨가 방법
16	〃	〃	〃	〃	38.3	〃	199	514	1,087	120	
17	〃	〃	〃	〃	36.2	〃	217	402	1,057	200	

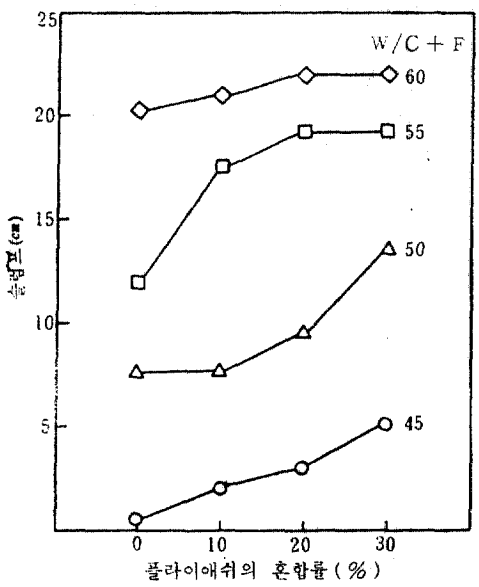


그림-1. 플라이애쉬의 혼합률과 콘크리트의 슬럼프와의 관계

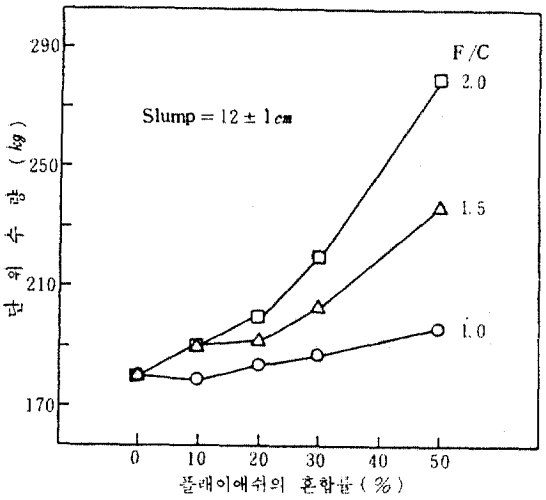


그림-2. 플라이애쉬의 혼합률과 콘크리트의 단위수량과의 관계

향은 양질의 플라이애쉬를 모르터나 콘크리트용 혼화재로 사용할 경우, 동일한 콘시스텐시의 모르터나 콘크리트를 얻기 위하여 단위수량을 약 7% 정도 감소시킬 수 있다는 연구내용[3]과 유사한 결과로 나타났으나 본 실험의 경우 플라이애쉬의 혼합비율을 10%씩 증가시키는 데 따라 잔골재율을 1~2%씩 낮추어 주었기 때문에 동일 물결합재비임에도 불구하고 슬럼프값이 얼마간 증가되는 요인이 되었다고 생각된다. 이번에는 슬럼프 12±1cm를 목표로 하여 굳지않은 콘크리트의 단위수량을 구하여 정리한 것이 그림-2 이다.

플라이애쉬의 증량치환비 F/C=1.0, 1.5 및 2.0에 따라 곡선의 기울기가 상이하며, 플라이애쉬의 혼합비율이 증가하는데 따라 단위수량이 증가하는 현상을 나타내어 Malhotra의 연구[5]나 그림-1의 결과와도 상반되는 경향임을 알 수 있다. 그 이유로서 그림-2의 경우 잔골재율을 일정하게 취한 배합상의 차이가 있는 점과 한편으로는 플라이애쉬의 비표면적이 시멘트에 비해 2,000cm²/g 이상 큰 점 및 플라이애쉬 중에 부정형 형상의 입자, 미연소탄소가 비교적 많이 함유된 점 등 플라이애쉬 자체의 품질상의 문제점으로 추정할 수 있겠다. 그래서 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 잔골재율과 슬럼프와의 관계를 나타낸 것이 그림-3으로서 동일한 플라이애쉬 혼합률에서 소요의 슬럼프값을 얻기 위하여 최적잔골재율이 존재함을 알 수 있다. 이상의 결과들을 종합해 볼 때 국산 플라이애쉬와 같이 비표면적이 일정하지 않고 粒子, 粒形이 균일하지 않은 품질의 플라이애쉬를[27] 콘크리트용 혼화재로 사용할 경우 동일한 단위수량으로 일정한 워커빌리티를 얻기 위해서는 배합설계시 잔

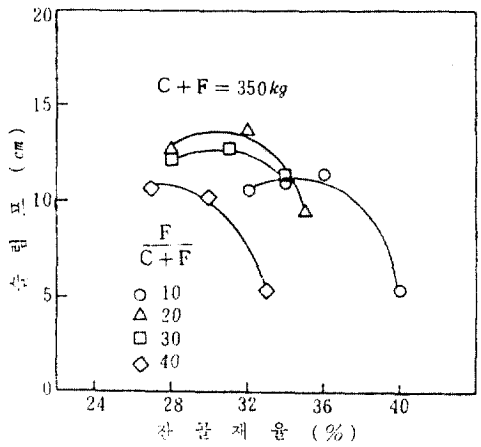


그림-3. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 잔골재율과 슬럼프와의 관계

골재율을 조정하는 방법에 대한 검토가 필요하다고 생각된다.

3-2. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 배합에 대한 고찰

플라이애쉬를 혼화재로 사용한 콘크리트의 배합방법 3종류에 따른 경화한 콘크리트의 강도특성을 알아보기 위하여 실시한 압축강도 시험결과를 정리한 것이 그림-4, 그림-5 및 그림-6이다. 먼저 표-4의 No. 1~No. 5 배합에 따른 플라이애쉬의 혼합률과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이 그림-4이다. 이 그림에서 슬럼프값 12±1cm를 얻기 위하여 플라이애쉬의 혼합률이

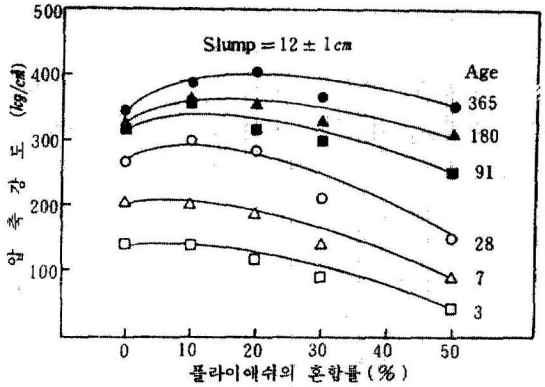
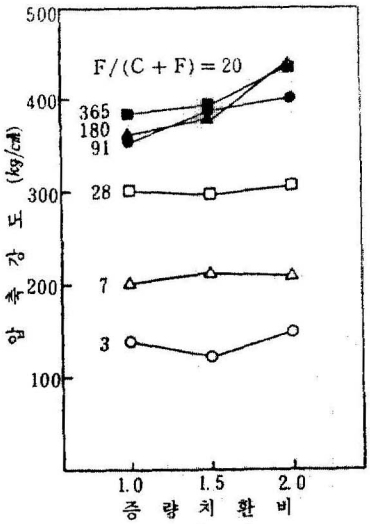
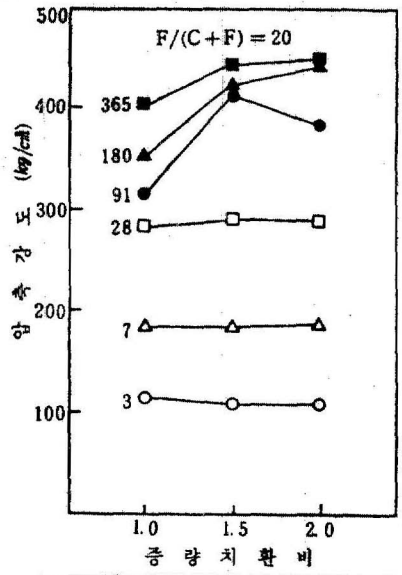
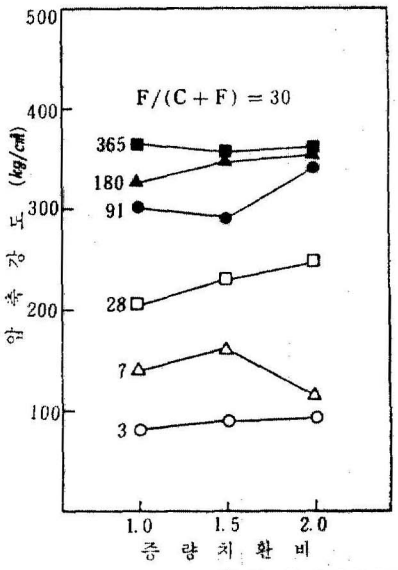


그림-4. 플라이애쉬혼합률과 압축강도와의 관계







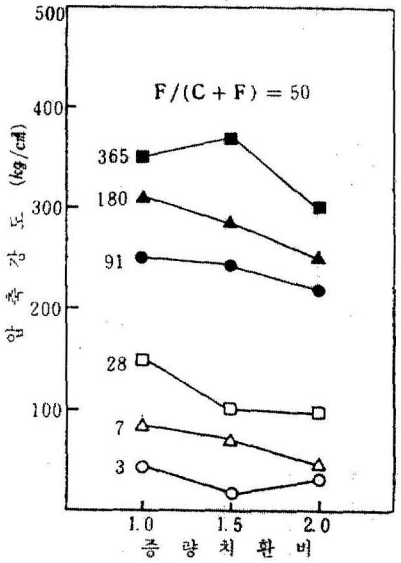


그림-5. 플라이애쉬를 증량치환한 콘크리트의 압축강도

10%씩 증가하는 데 따라 단위수량이 1~2%씩 증가되었으며, 이 때의 초기재령에서의 압축강도는 혼합률이 증가하는데 따라 감소되는 경향을 나타내었으나 재령 28일 이후의 장기재령에서는 혼합률 10~20%에서 강도의 피크를 나타내었다. 플라이애쉬의 혼합률이 20%이상 증가하는 데 따라 재령에 관계없이 강도가 저하되는 경향을 나타내므로써 재령에 따라 얼마간 상이하기는 하나 플라이애쉬 혼합률의 적정값이 존재함을 알 수 있다. 이번에는 증량치환 배합방법에 의한 콘크리트의 압축강도 측정결과를 정리한 것이 그림-5이다. 이 그림에서 플라이애쉬의 증량치환비는 1.0, 1.5 및 2.0이며 플라이애쉬의 혼합률과 재령에 따라 압축강도의 경향이 상이하기 때문에 일률적으로 설명하기 어려우나 F/C=1.5, 2.0 및 F/C+F=10, 20%인 콘크리트의 경우, 장기재령에서 약간의 강도가 증진되는 효과가 있었으나 F/C+F=30, 50%의 경우 오히려 강도에 도움이 되지 못하는 결과를 나타내었다. 이상의 결과는 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 早期强度를 개선하기 위한 목적으로 증량치환방법을 채택하였으나, 결국 소요의 워커빌리티를 만족시키기 위하여 단위수량을 대폭 증대시켜야하는 문제점 때문에 강도증진에 큰 도움을 주지 못하는 결과를 초래하였다고 생각된다. 세번째는 단위시멘트량을 400kg으로 고정시켜 놓고 플라이애쉬의 첨가량과 콘크리트의 압축강도와의 관계를 나타낸 것이 그림-6이다. 첨가량이 증가하는 데 따라 목표 슬럼프 12±1cm를 만족시키기 위한 단위수량이 증가되었으나 플라이애쉬의 첨가량으로 물결합재비는 오히려 감소되는 결과를 나타내었다. 그래서 첨가율 20%(첨가량 80kg) 정도에서 재령 28, 91일의 압축강도가 약 70% 정도 크게 나타났다. 반면에 첨가율 30, 50%에서는 강도증진효과가 둔화됨을 알 수 있다. 즉, 플라이애쉬를 시멘트에 첨가하는 방법의 경우에도 적정첨가율이 존재하며 강도증진에 유효함을 나타내는 결과로 생각된다.

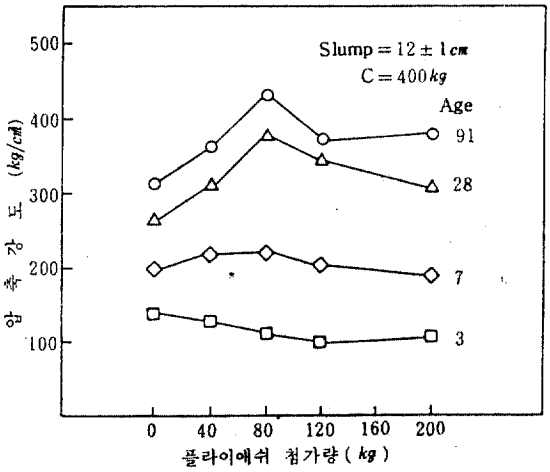


그림-6. 플라이애쉬 첨가량과 콘크리트의 압축강도와의 관계

3-3. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 강도에 대한 고찰

(1) 플라이애쉬의 포졸란 반응성과 강도

플라이애쉬의 포졸란 반응성을 수치적으로 나타내는 것으로 Ferét 계수가 사용되며 Ferét 계수는 양생조건, 재령 등에 의하여 결정되는 상수로서 不活性物質의 경우에는 반응의 정도에 따라 값이 달리나타난다고 한다. 여기서는 국산 플라이애쉬 15종류를 시료로 하여 KS L 5105에 의한 모르터의 압축강도용 공시체를 제조하여 재령 28, 91일의 압축강도를 측정하여 구한 Ferét 계수와 압축강도와의 관계를 나타낸 것이 그림-7이다.

Ferét 계수의 상한값과 하한값과의 범위가 크고 변동의 폭이 크면 일반적으로 플라이애쉬의 포졸란 반응이 활발함을 의미한다. 그래서 그림-7의 재령 28일과 91일의 Ferét 계수를 비교해

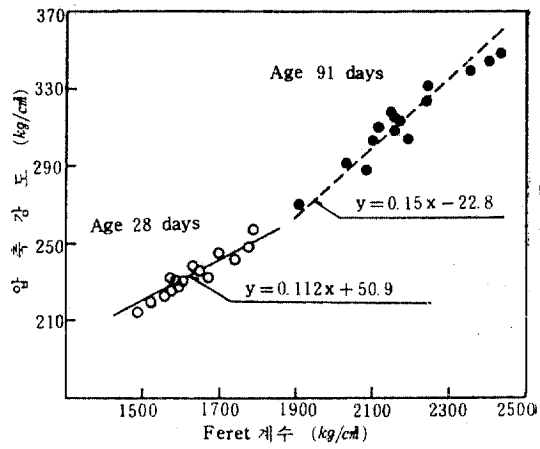


그림-7. 플라이애쉬의 포졸란 반응성과 모르터의 압축강도와의 관계

볼 때 재령 91일의 Ferét 계수의 범위가 크고 변동의 폭도 약간 크게 나타나 포졸란 반응이 활발함을 나타내었다. 한편으로 플라이애쉬의 포졸란 반응은 組成相 중의 유리질상의 반응성, 분말도에 따라 좌우된다는 새로운 개념이 도입되고 있으나 유리질상의 양이나 분말도를 알아내기는 쉽지 않기 때문에 44μm체의 잔류량으로 반응성을 평가하는 방법이 사용되고 있다. 그래서 플라이애쉬의 44μm체의 잔류량과 Ferét 계수와의 상관관계를 회귀분석해 본 결과 상관계수가 재령 28일과 91일에 각각 5%와 25%정도였으며 재령이 증가하는 데 따라 상관성이 크게 나타났다. 이러한 경향은 재령 91일 정도에서 포졸란 반응이 활발함을 시사하는 결과로 생각된다.

(2) 물결합재비와 압축강도

Lyse에 의하면 콘크리트의 강도와 시멘트물비 사이에는 일반적으로 직선관계가 성립된다고 한다. 플라이애쉬를 5단계로 혼합한 20배합 콘크리트의 결합재물비와 압축강도와의 관계를 정리한 것이 그림-8이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 경우에도 혼합률에 따라 강도의 차이는 얼마간 있으나 강도발현의 경향은 대체로 비슷하며 보통콘크리트와 마찬가지로 결합재물비와 압축강도 사이에는 직선적인 상관관계가 있음을 알 수 있다.

(3) 재령과 압축강도

플라이애쉬의 혼합률을 4단계로 변화시켜 혼합한 콘크리트의 압축강도와 재령과의 관계로 나타낸 것이 그림-9이다. 재령3,7일에서 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 조기강도가 보통콘크리트보다 작았으나 재령 28일부터 플라이애쉬의 혼합률에 따라서는 보통콘크리트의 압축강도보다 오히려 크게 나타났다. 이러한 경향은 플라이애쉬의 포졸란반응에 의한 장기강도의 증진이 크다는 지금까지의 연구와도 유사한 좋은 성과를 나타낸 결과로 생각된다. 한편 조기강도를 개선할 목적으로 플라이애쉬를 증량치환방법에 의하여 배합한 콘크리트의 압축강도와 재령과의 관계를 나타낸 것이 그림-10이다. 여기서도 그림-9와 마찬가지로 조기재령에서 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도는 크게 개

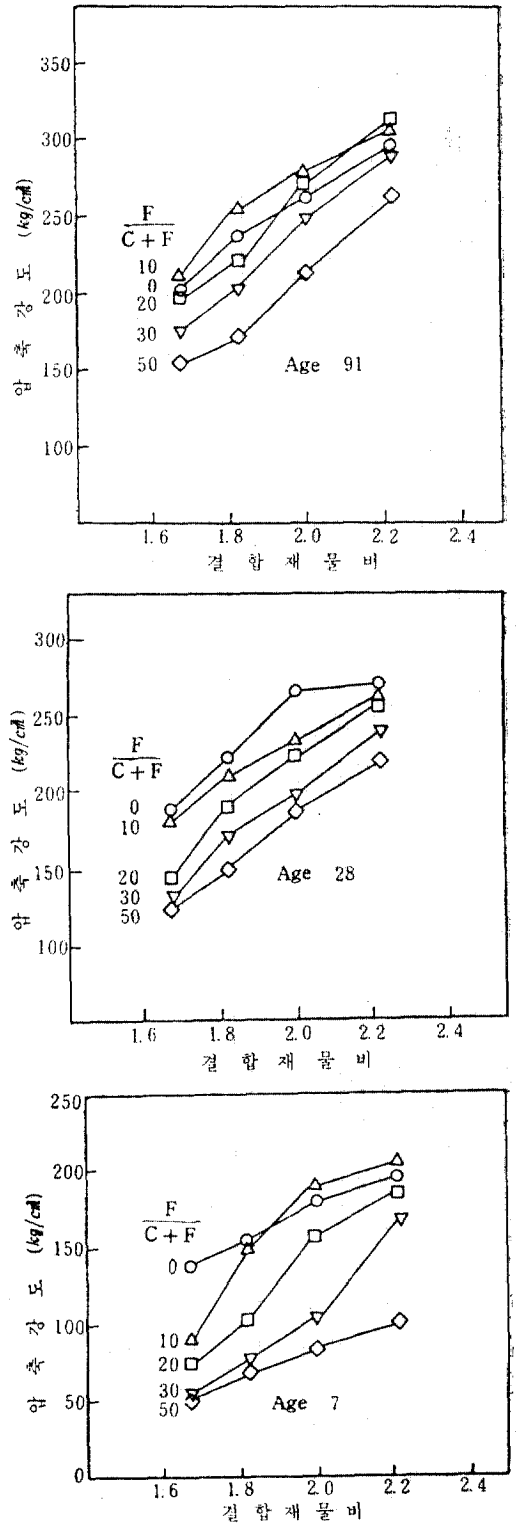


그림-8. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 결합재물비와 압축강도와의 관계

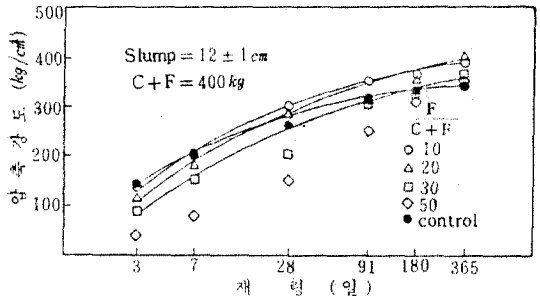


그림-9. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 재령과 압축강도와의 관계

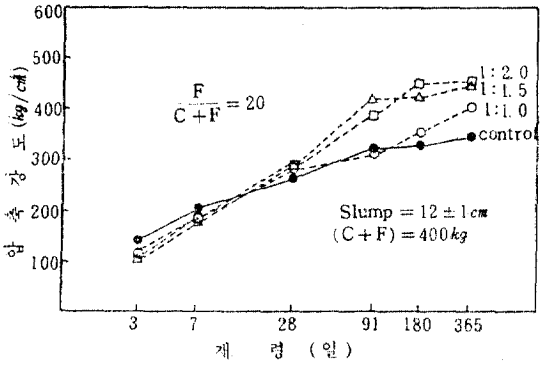


그림-10. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 재령과 압축강도와의 관계

선되지 않았으나 재령 28일 이후의 장기재령에서는 증량치환방법에 의한 콘크리트의 강도증진 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

(4) 압축강도와 인장강도

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계를 알아보기 위하여 정리한 것이 그림-11이며, 압축강도에 대한 인장강도비가 $\frac{1}{8}$~$\frac{1}{9}$ 정도로서 보통콘크리트와 비슷함을 알 수 있다. 다만 재령 91일의 압축강도와 인장강도의 상관관계가 재령 28일보다 좋은 점은 플라이애쉬의 포졸란반응에 의한 강도의 안정된 발현때문으로 생각된다.

(5) 압축강도와 탄성계수

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 탄성계수는 조기재령에서는 보통콘크리트보다 작으나 장기재

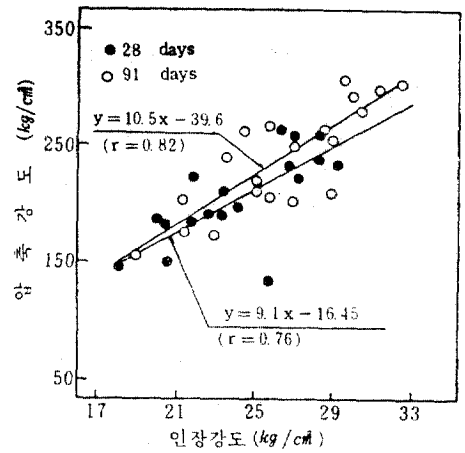


그림-11. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계

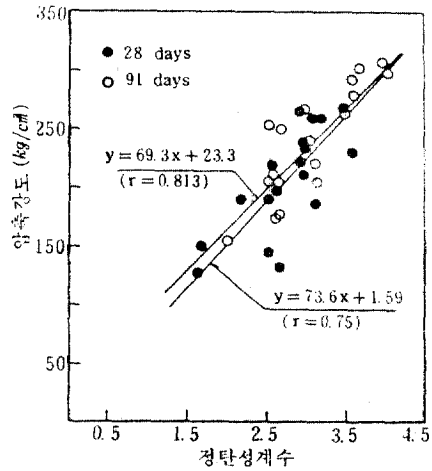


그림-12. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수와의 관계

령에서는 오히려 크다는 연구보고[6]가 있으나 관련자료가 많지 않은 것 같다. 여기서는 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도와 정탄성계수와의 관계로 정리한 것이 그림-12이다.

이 그림에서 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수와의 사이에는 보통콘크리트와 비슷한 상관관계가 있음을 알 수 있으며 재령 91일에서 상관계수가 약간 좋게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

(1) 국산 플라이애쉬의 품질상의 문제점 때문에 혼합률이 증가하는 데 따라 단위수량이 증가하는 경향을 나타내었다. 그래서 동일 물결합재비에서 소요의 워커빌리티를 확보하기 위해서 배합설계시 최적잔골재율에 대한 검토가 요망된다.

(2) 플라이애쉬를 혼화재로 사용한 일반적인 콘크리트 배합방법의 경우, 혼합률에 따라 강도의 피크와 저하경향이 명확하게 나타났으며 플라이애쉬를 증량치환하는 배합방법의 경우 장기재령에서 강도의 증진효과는 있었으나 조기강도를 개선하는 데는 큰 도움이 되지 못했다. 그리고 플라이애쉬를 첨가하는 배합방법의 경우 강도증진효과는 있었으나 적정첨가율과 경제성에 대한 검토가 요망된다.

(3) 플라이애쉬의 포졸란반응을 나타내는 Feret 계수와 국산 플라이애쉬를 사용한 모르터의 압축강도와의 관계에 대하여 검토한 결과 재령 91 일에서 포졸란반응이 활발함을 알 수 있었으며 44μm 체의 플라이애쉬 잔류량과 Feret 계수와의 상관성은 장기재령에서 크게 나타났다.

(4) 플라이애쉬의 혼합률에 따라 강도의 차이는 얼마간 있었으나 결합재물비와 압축강도 사이에는 보통콘크리트와 거의 비슷한 직선적인 관계를 나타내었다. 또한 압축강도와 인장강도 및 탄성계수와의 사이에는 보통콘크리트에 상응하는 결과를 나타내었으며 장기재령일수록 상관성이 약간 좋게 나타났다.

(5) 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 조기재령의 압축강도는 보통콘크리트보다 대체로 작았으나 재령 28 일 이후 장기재령에서의 압축강도는 보통콘크리트보다 증진된 좋은 성과를 나타내었다. 특히 증량치환방법에 의한 콘크리트의 장기재령에서의 강도증진효과가 큼을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

1. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete," *ACI Materials Journal*, Sep.-Oct. 1987.
2. R.O. Lane, J.F. Best, "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete," *Concrete International*, July 1982.
3. M. Kokubu, "Fly Ash and Fly Ash Cement," *Cement Association of Japan*, Tokyo, Vol.IV-2, 1969.
4. R.C. Meininger, "Use of Fly Ash in Cement and Concrete-Report of Two Recent Meetings," *Concrete International*, July 1982.
5. E.E. Berry and V.M. Malhotra, "Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review," *ACI Journal*, Mar.-Apr. 1980.
6. R.O. Lane, "Effect of Fly Ash on Freshly Mixed Concrete," *Concrete International* Oct. 1983.
7. Dan Ravina, "Efficient Utillization of Coarse and Fine Fly Ash in Precast Concrete by Incorporating Thermal Curing," *ACI Journal*, May-June 1981.
8. Katharine Mather, "Tests and Evaluation of Portland and Blended Cements for Resistance to Sulfate Attack," *ASTM*, STP-663, 1978.
9. P.K. Mehta, "Effect of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement," *ACI Journal*, Nov.-Dec., 1986.
10. Ramon L. Carrasquillo, Peter G. Snow, "Effect of Fly Ash on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete," *ACI Materials Journal*, July-August 1987.
11. Roy W. Carlson, Donald L. Houghton, Milos Polivka, "Causes and Control of Cracking in Unreinforced Mass Concrete," *ACI Journal*, July 1979.
12. V.M. Malhotra, "Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications," *Concrete International*, Dec. 1986.
13. Ernest K. Schräder, "The First Concrete Gravity Dam Designed and Built for Roller Compacted Construction Methods," *Concrete International*, Oct. 1982.
14. Paul R. Stodola, "Performance of Fly Ash in Hardened Concrete," *Concrete International*, Dec. 1983.
15. Walter H. Price, "Pozzolans-A Review," *ACI Journal*, May 1975.
16. 内川 浩外, "フライアッシュのキヤラクターと各種

混和劑の吸着特性," セメント 技術年報 36, 1982.
17. 長瀧重義, フライアッシユセメントペーストの流動性と高性能減水劑の吸着", セメント技術年報 36, 1982.
18. 大槻光雄外, "最近のフライアツシユの性狀", セメント・コンクリート, June 1984.
19. Robert W. Cannon, "Proportioning Fly Ash Concrete Mixes for Strength and Economy," *ACI Journal*, Nov. 1968.
20. G.R. Mass, "Proportioning Mass Concrete and Incorporating Pozzolans Using ACI 211.1," *Concrete International*, Aug. 1982.
21. John M. Albinger, "Fly Ash for Strength and Economy," *Concrete International*, Apr. 1984.
22. James E. Cook, "Research and Application of High Strength Concrete Using Class C Fly Ash," *Concrete International*, July 1982.
23. Robert W. Cannon, "Proportioning No-Slump Concrete for Expanded Applications," *Concrete International*, Aug. 1982.
24. P. Nelson, J.B. Ashby, C.J. Tyndall, "Concrete Mix Proportioning and Prediction of Field Performance Using Munmorah Fly Ash," *Concrete International*, July 1982.
25. Sandor Popovics, "Strength Relationship of Fly Ash Concrete,"*ACI Journal* Jan.-Feb. 1982.
26. R.N. Swany, Sami A.R. Ali, D.D. Theodorakopoulos, "Early Strength Fly Ash Concrete for Structural Application," *ACI Journal* Sep.-Oct. 1985.
27. 文翰英, 徐政佑, "콘크리트용 혼화재로서 국산플라이애쉬의 품질에 관한 실험적연구", **大韓土木學會論文集**, 第7卷 第3號, 1987年 9月

(接受 : 1988. 5. 24)