

치환방법에 따른 플라이애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 공학적 특성

The Mechanical Properties of Concrete Using
a Large Amount of Fly Ash for Replacement Method

김 태 완*

김 태 식**

진 치 섭***

Kim, Tae-Wan

Kim, Tae-Sik

Jin, Chi-Sub

Abstract

This paper presents the results of an experimental investigation carried out to evaluate the mechanical properties of concrete mixtures in which fine(S) and coarse(G) aggregate was fully replaced with fly ash(FA). And flowability reduction problem in a large amount of fly ash concrete settled addition water(W_f) in concrete mixture. In the test, water-cement ratio(W_c/C) was 0.35, 0.45, and water-fly ash ratio(W_f/FA) was 0.35, 0.45. The fly ash replacement is two different method of P and Q. The P method is mix property that the fly ash and addition water(W_f) weight is equal to the aggregate weight [$FA + W_f = G$ (or S)]. The Q method is mix property that fly ash is equal to aggregate weight, and added addition water(W_f) [$FA + W_f > G$ (or S)]. Test were performed for properties of fresh concrete and compressive strength were determined at 3, 7, 28 and 91 days. The result, compressive strength was improvement that $W_c/C=0.35$, $W_f/FA=0.35$ and fine aggregate replacement in P method series than others. The flowability at Q method was improvement result than P method, but compressive strength was not. Test results indicate significant improvement in the strength properties and flowability of plain concrete by the inclusion of fly ash as fully replacement of fine and coarse aggregate, and can be effectively the fly ash replacement method.

요 지

본 연구는 잔골재와 굵은 골재를 전량 플라이애쉬로 치환한 콘크리트의 공학적 특성을 밝히기 위한 실험적 연구의 결과이다. 그리고 플라이애쉬 전량 치환 콘크리트의 유동성 저하 문제를 첨가수량(W_f)으로 해결하고자 하였다. 실험은 물-시멘트 비(W_c/C)를 0.35, 0.45 그리고 물-플라이애쉬 비(W_f/FA)를 0.35, 0.45로 하였다. 플라이애쉬 치환은 P와 Q의 두 가지 방법으로 하였다. P 방법은 플라이애쉬와 첨가수량(W_f)의 중량이 골재의 중량과 같은 배합법이다 [$FA + W_f = G$ (또는 S)]. Q 방법은 플라이애쉬와 골재의 중량이 같고 첨가수량(W_f)을 추가하는 배합법이다 [$FA + W_f > G$ (또는 S)]. 실험은 굳기 전 콘크리트의 특성과 3, 7, 28 및 91일 압축강도 특성을 측정하였다. 실험결과 압축강도는 $W_c/C=0.35$, $W_f/FA=0.35$ 일 때, P 치환법 중에서 잔골재 치환이 다른 배합들보다 향상되었다. Q 방법은 P 방법에 비해 유동성은 향상되었으나, 압축강도는 그렇지 않았다. 실험결과는 잔골재와 굵은 골재를 플라이애쉬로 전량 치환한 콘크리트의 유동성과 강도 특성이 향상됨을 알 수 있었고, 플라이애쉬 치환방법으로 효과적임을 보여주었다.

Keywords : A large amount of fly ash, Replacement method, Water-fly ash ratio

핵심 용어 : 다량 치환 플라이애쉬, 치환방법, 물-플라이애쉬 비

* 정희원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, (주)KRT 연구소 전임연구원

*** 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail : blueism@hanmail.net 051-510-1534

•본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬는 포졸란 물질로서 최근에 부각된 환경문제와 폐자원의 활용이라는 관점에서 여러 연구가 활발히 진행되고 있다. 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 블리딩 감소, 건조수축 억제, 알칼리-골재 반응 저감, 단위질량 감소, 수화열 저감, 장기강도 증대 등의 많은 장점이 있으나 플라이애쉬의 치환율이 증가할수록 초기강도 저하가 두드러지고 유동성이 급격히 나빠지는 단점도 있다. 지금까지 플라이애쉬 콘크리트는 많은 연구를 통하여 그 특성이 개발되고 개량되어 수밀성 구조물, 매스 콘크리트, 화학침식 저항 구조물 및 경량 콘크리트 등에 활용되고 있다.⁽¹⁾

기존의 연구들에서 플라이애쉬 콘크리트는 플라이애쉬를 시멘트 중량 혹은 부피에 대해 치환한 연구⁽²⁾⁽³⁾⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾가 중심이었으나 최근에는 시멘트와 일부 잔골재의 치환을 통한 콘크리트의 연구도 활발해지고 있다.⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾ 이에 본 연구는 굵은골재 및 잔골재를 전량 플라이애쉬로 치환할 경우, 수화반응에 관여하지 않는 골재를 대신해 포졸란 반응성이 있는 플라이애쉬로 치환함에 있어 치환방법에 따른 플라이애쉬 콘크리트의 공학적 특성 중 굳기 전 특성 및 강도특성에 대해 알아보려 한다.

2. 실 험

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트 1종을, 잔골재는 밀도 2.58 g/cm³인 하천사를, 굵은골재는 밀도 2.65 g/cm³, 최대치수가 20mm인 쇠석골재를 각각 사용하였다. 플라이애쉬는 보령산을 사용하였다. 각 재료의 성분은 Table 1과 Table 2와 같다. 또한 사용한 혼화제는 고성능 유동화제로 주요 성질은 Table 3에 나타내었다.

Table 1 골재의 특성

	FM	Density (g/cm ³)
Fine Aggregate	2.35	2.58
Coarse Aggregate	7.27	2.65

Table 2 플라이애쉬의 물리-화학적 특성

Chemical composition of raw material		
	OPC (%)	Fly Ash (%)
SiO ₂	20.68	58.62
Al ₂ O ₃	5.16	23.74
Fe ₂ O ₃	3.02	7.43
CaO	62.42	3.27
MgO	2.80	0.84
SO ₃	1.81	0.53
Loss on ignition	1.22	3.21
Physical properties of raw material		
Density (g/cm ³)	3.15	2.15
Specific surface of raw material (cm ² /g)		
	3,150	3,450

Table 3 혼화제의 특성

Type	pH	Density (g/cm ³)	SO ₄ (%)
powder	8.42	0.71	2.04

2.2 실험 계획

플라이애쉬는 다공질 구조로서 표면에 수분 및 혼화제의 흡착으로 인하여 콘크리트 배합시 유동성 저하가 발생한다. 이러한 유동성 저하를 억제하기 위해 고성능 혼화제의 첨가 또는 단위수량을 증가시키는 방법 등이 있다. 따라서 본 연구는 혼화제의 사용량을 줄이고 적절한 단위수량의 추가를 통해 다량의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 소요 유동성과 구조용 재료로서의 강도를 확보하고자 하였다. 플라이애쉬를 시멘트 일부로 치환하게 되면 단위중량, 경제성 등에서 유리하지만 유동성과 초기강도 저하 등의 문제점이 있고, 골재의 일부로 치환하는 경우는 시멘트 치환과 달리 초기강도 저하는 발생하지 않는다.⁽¹⁾ 따라서 본 연구는 골재를 플라이애쉬로 전량 치환하여 플라이애쉬 다량 치환 콘크리트를 개발하는 데 기초적인 자료를 제시하고자 한다. 플라이애쉬를 골재로 치환하는 연구는 기존에 연구가 미흡했던 부분이며, 최근에 골재의 수급문제와 양질의 골재 확보의 어려움 및 폐자원의 활용 등의 환경적 측면도 함께 고려하고자 하였다.

본 연구에서는 콘크리트를 이루는 골재, 즉 굵은골재와 잔골재를 플라이애쉬로 치환한 콘크리트의 특성을 알아보기 위해 다음과 같은 치환방법을 제안하였

다. 골재의 치환은 굵은골재를 전량 플라이애쉬로 치환하는 것(G CASE)과 잔골재를 전량 플라이애쉬로 치환하는(S CASE) 두 가지 방법을 선정하였다. 또한 각각의 골재를 치환하는 데 있어서 플라이애쉬의 다량 치환은 단위수량의 부족으로 유동성 저하 및 배합이 어려우므로 이러한 문제를 해결하기 위해 추가적인 수량을 더해 주는 방법을 택하였다. 여기서 추가하는 수량을 물-시멘트 비(W_c/C)의 단위수량(W_c)과 구분하고자 첨가수량(W_f)으로 정의하였다. 수량을 추가하는 방법을 골재의 중량이 첨가수량(W_f)과 플라이애쉬(FA) 중량의 합과 같도록 하는 배합(P CASE)과, 골재의 중량과 플라이애쉬(FA)의 중량을 같게 치환하고 여기에 수량(W_f)을 추가하는 배합(Q CASE)의 두 가지로 하여 각각의 배합에 따른 강도특성을 알아보고자 했다. 또한 추가되는 수량(W_f)도 두 가지 물-플라이애쉬 비(W_f/FA)로 구분하여 추가 수량의 변화에 따른 플라이애쉬 콘크리트의 특성도 파악하고자 하였다.

본 연구에서 제안한 치환방법은 기존의 배합에서 플라이애쉬를 다량 치환할 경우 발생하는 유동성 문제를 해결하고, 강도 측면을 고려하여 추후 이루어질 연구의 기초자료로서 각 골재의 전량 치환, 첨가수량(W_f)의 변화 및 물-시멘트 비(W_c/C)의 변화, 물-플라이애쉬 비(W_f/FA)에 따른 특성을 알아보기 위한 치환방법을 선정하였다. 지금까지 설명한 배합설계의 개념은

P CASE	$FA + W_f = G$ (or S)
Q CASE	$FA + W_f > G$ (or S)

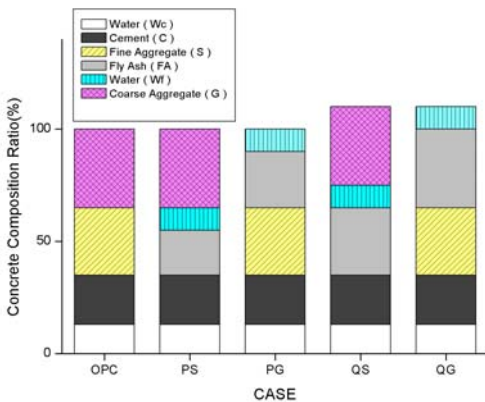


Fig. 1 배합설계 개요(P CASE and Q CASE)

Fig. 1과 같다. 또한 기존의 보통강도에 대한 연구⁽²⁾⁽³⁾⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾를 벗어나 고강도 콘크리트에 적용하고자 물-시멘트 비(W_c/C)를 0.35와 0.45로 두 가지로 하고 각각의 물-시멘트 비에 대해 물-플라이애쉬 비(W_f/FA)를 0.35와 0.45로 구분하였다. 혼화제는 고성능 유동화제를 사용하고, 사용량은 굵은골재 치환 배합(G CASE)은 시멘트 중량의 1.0 %를 사용하였고, 잔골재 치환 배합(S CASE)은 충분한 유동성을 확보할 수 있어 사용하지 않았다. 배합표는 Table 4에 나타내었다.

Table 4 배합설계 (Unit : kg/m³)

OPC3	W _c /C	S			G	
	0.35	720.00			980.00	
	W _c /C	S			G	
		W _f /FA	FA	W _f		
P3SA	0.35	0.35	533.33	186.67	980.00	
P3SB	0.35	0.45	496.55	223.45	980.00	
Q3SA	0.35	0.35	720.00	252.00	980.00	
Q3SB	0.35	0.45	720.00	324.00	980.00	
	W _c /C	S			G	
		W _f /FA	FA	W _f		
P3GA	0.35	720.00	0.35	725.92	254.08	
P3GB	0.35	720.00	0.45	675.86	304.14	
Q3GA	0.35	720.00	0.35	980.00	343.00	
Q3GB	0.35	720.00	0.45	980.00	441.00	
OPC4	W _c /C	S			G	
	0.45	670.00			892.00	
	W _c /C	S			G	
		W _f /FA	FA	W _f		
P4SA	0.45	0.35	496.30	173.70	892.00	
P4SB	0.45	0.45	462.07	207.93	892.00	
Q4SA	0.45	0.35	670.00	234.50	892.00	
Q4SB	0.45	0.45	670.00	301.50	892.00	
	W _c /C	S			G	
		W _f /FA	FA	W _f		
P4GA	0.45	670.00	0.35	660.74	231.26	
P4GB	0.45	670.00	0.45	615.71	276.83	
Q4GA	0.45	670.00	0.35	892.00	312.20	
Q4GB	0.45	670.00	0.45	892.00	401.40	

Index

- P : $W_f + FA = G$ (or S), Q : $W_f + FA > G$ (or S)
- 3 : $W_c/C = 0.35$, 4 : $W_c/C = 0.45$
- A : $W_f/FA = 0.35$, B : $W_f/FA = 0.45$
- S : Fine aggregate, G : Coarse aggregate

2.3 실험 방법

시편의 제작은 먼저 플라이애쉬, 시멘트, 골재를 투입하여 1분간 건비빔 후 배합수(W_c)와 첨가수량(W_f)를 투입하여 배합한다. 이때 고성능 유동화제를 첨가한다. 공시체는 $\text{Ø}10 \times 20$ cm의 크기로 제작하였으며, 재령 3, 7, 28, 91일까지 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 수중양생하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 유동성

플라이애쉬를 잔골재 치환으로 실험한 경우는 슬럼프를, 굵은골재 치환으로 실험한 경우에는 플로우치를 측정하여 유동 특성을 살펴보았다.

Fig. 2와 Fig. 3은 본 연구에서 제안한 치환방법을 통해 유동성을 측정된 결과를 나타내고있다. 플라이애쉬의 중량이 골재와 첨가수량(W_f)의 중량과 같은 배합의 경우(P CASE)가 플라이애쉬 중량이 골재 중량과 동일하고 첨가수량(W_f)을 추가한 경우(Q CASE)보다 유동성이 작게 나왔다. 슬럼프의 경과에서 보는바와 같이 모든 실험의 경우가 OPC보다 양호한 유동 특성을 나타내고 있다. 이는 본 연구에서 제안한 치환방법 및 첨가수량(W_f)을 추가하는 방법이 유동성을 향상시키는데 효과적임을 알 수 있었다.

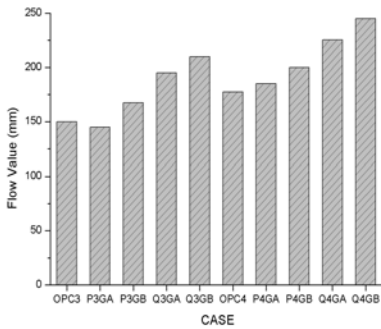


Fig. 2 유동성(굵은골재 치환)

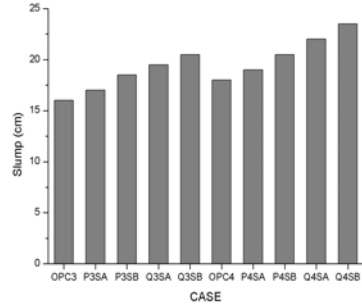


Fig. 3 유동성(잔골재 치환)

3.2 공기량

플라이애쉬를 치환한 콘크리트의 공기량은 플라이애쉬의 미연탄소분에 의한 작용으로 OPC에 비해 상대적으로 작은 것이 일반적인 연구의 결과로 보고되고 있다.⁽⁹⁾ 본 실험에서도 이와 유사한 경향을 나타내고 있음을 Fig. 4와 Fig. 5를 통해 알 수 있었다. 플라이애쉬를 굵은골재로 치환한 경우(G CASE)가 잔골재로 치환한 경우(S CASE)에 비해 공기량이 더 작게 나타났다. 이는 치환하는 플라이애쉬 양과 관련있는 것을 판단된다. 하지만 일정 공기량 수준을 요하는 AE콘크리트나 동결융해 저항성을 고려해야하는 콘크리트의 경우에는 강열감량이 낮은 플라이애쉬의 사용이나 AE제 또는 고성능 AE제의 사용 등을 통해 적정 수준의 공기량을 확보하는 연구가 후속되어야 할 것으로 판단된다.

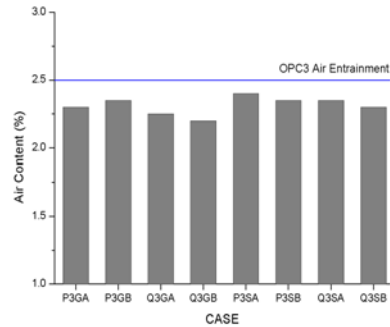


Fig. 4 공기량($W_c/C=0.35$)

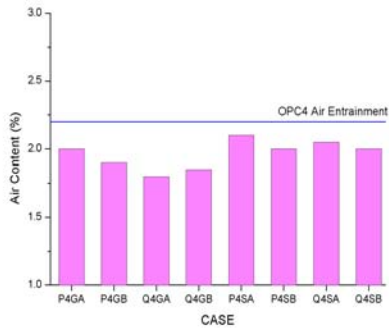


Fig. 5 공기량($W_c/C=0.45$)

3.3 응결시간

응결시간은 플라이애쉬를 치환한 모든 시험체의 응결시간이 OPC보다 길어진 것을 Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있었다. 플라이애쉬 중량과 골재 중량이 같고 첨가수량(W_f)만 더한 경우(Q CASE)의 응결시간이 플라이애쉬와 첨가수량(W_f)의 중량 합이 골재의 중량과 동일하게 치환한 경우(P CASE)의 응결시간보다 길게 나타났다. 이것은 플라이애쉬의 치환량과 첨가수량이 P CASE보다 많은 Q CASE에서 잘 나타나고 있다. 또한 굵은골재를 치환한 경우(G CASE)와 잔골재를 치환한 경우(S CASE)의 응결특성은 큰 차이를 나타내지는 않았지만, 굵은골재를 치환한 경우(G CASE)의 응결시간이 잔골재를 치환한 경우(S CASE)에 비해 3~5 % 더 늦었다.

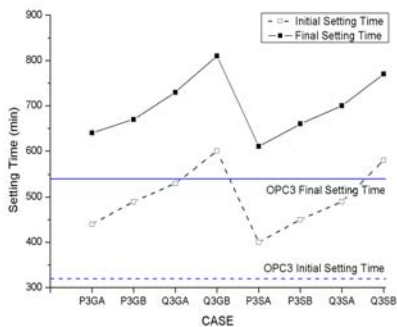


Fig. 6 응결시간($W_c/C=0.35$)

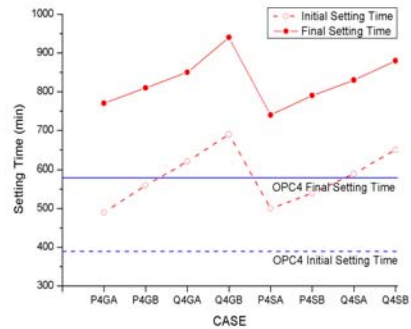


Fig. 7 응결시간($W_c/C=0.45$)

3.4 압축강도

28일 압축강도 실험결과를 기준으로 볼 때, Table 5, Fig. 8과 Fig. 9에서 잔골재 치환의 경우(S CASE)는 굵은골재 치환의 경우(G CASE)보다 7.8 ~ 17.5%의 강도 증대가 있었고, 플라이애쉬와 첨가수량(W_f)의 중량 합이 골재의 중량과 같게 치환한 경우(P CASE)의 강도가 플라이애쉬를 골재 중량과 동일하게 치환하고 첨가수량(W_f)을 더한 경우(Q CASE)에 비해 9.5 ~ 17.6%의 강도 증대가 있었다. 또한 잔골재 치환의 경우(S CASE)는 플라이애쉬와 첨가수량(W_f)의 중량 합이 골재의 중량과 같게 치환한 경우(P CASE)가 플라이애쉬를 골재 중량과 동일하게 치환하고 첨가수량(W_f)을 더한 경우(Q CASE)보다는 강도 증대가 컸으며 OPC보다도 좋은 결과를 보여주고 있다. 그러나 굵은 골재 치환의 경우(G CASE)는 모두 OPC보다 낮은 강도를 보였다. Q CASE는 P CASE보다, G CASE는 S CASE보다 강도가 작게 나타났는데, 이는 치환하는 플라이애쉬량과 첨가수량이 많아 강도 발현이 늦어지는 것으로 판단된다. 하지만 전반적으로 플라이애쉬로 치환한 콘크리트는 재령이 증가할수록 강도 증가폭이 OPC의 강도 증가폭에 비해 큰 것을 관찰할 수 있다. 물-시멘트 비(W_c/C)에 따른 강도 특성은 $W_c/C=0.35$ 의 시험체가 $W_c/C=0.45$ 보다 좋은 강도 특성을 보여 주고 있으며, 물-플라이애쉬 비(W_f/FA)에 따른 강도 특성도 이와 같은 경향을 나타내고 있다.

Table 5 압축강도 (unit : MPa)

CASE	3일	7일	28일	91일
OPC3	21.31	32.79	45.07	46.81
P3GA	10.21	21.50	44.01	60.14
P3GB	10.98	20.64	42.96	59.24
Q3GA	9.47	18.14	39.87	54.26
Q3GB	7.01	16.40	36.54	50.79
P3SA	13.47	25.76	48.35	67.69
P3SB	12.29	23.85	46.96	65.27
Q3SA	11.50	21.06	44.21	59.24
Q3SB	9.12	20.11	43.57	58.25
OPC4	17.27	29.28	38.16	40.03
P4GA	10.45	19.51	36.71	51.39
P4GB	9.54	16.05	33.15	44.75
Q4GA	7.19	14.72	30.24	43.01
Q4GB	5.87	13.74	29.08	40.30
P4SA	11.52	21.68	43.52	60.05
P4SB	10.31	18.83	38.75	52.71
Q4SA	7.32	15.18	35.83	49.08
Q4SB	5.96	12.96	31.94	42.73

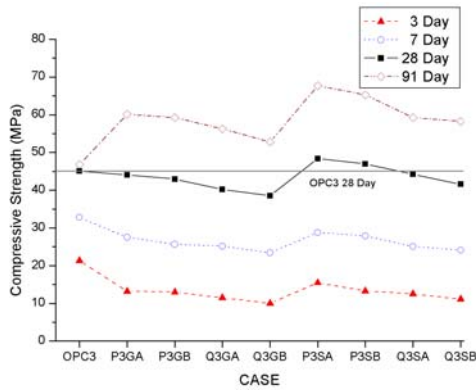


Fig. 8 치환골재 및 치환 방법에 따른 압축강도(Wc/C=0.35)

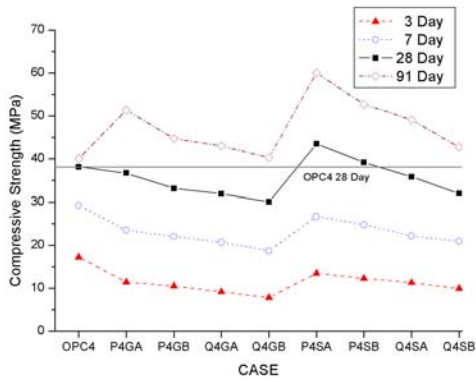


Fig. 9 치환골재 및 치환 방법에 따른 압축강도(Wc/C=0.45)

치환방법 및 치환골재에 따른 플라이애쉬 다량 치환 콘크리트의 강도 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

PS > OPC > PG > QS > QG	
$W_c/C = 0.35 > 0.45$	$W_f/FA = 0.35 > 0.45$

Fig. 10, Fig. 11은 재령에 따른 각 시험체의 압축강도를 보여주고 있다. 시험체의 91일 강도는 전반적으로 OPC보다 향상된 결과를 나타내어 장기재령에서의 플라이애쉬 다량 치환 콘크리트의 강도 특성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

압축강도 실험결과를 토대로 각 치환방법에 따른 강도 추정식을 산정해 보았다. 추정식은 시멘트(C), 배합수(W_c), 첨가수량(W_f), 전체수량($W_t=W_c+W_f$)과 분체(Binder, $B=C+FA$)의 요소를 통해 물-시멘트비(W_c/C)과 물-분체비(W_f/B)의 관계를 통해 추정하였다.

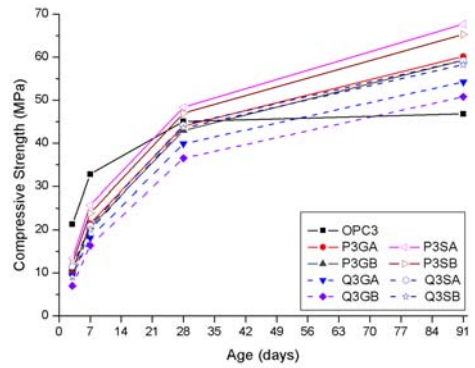


Fig. 10 재령에 따른 압축강도(Wc/C=0.35)

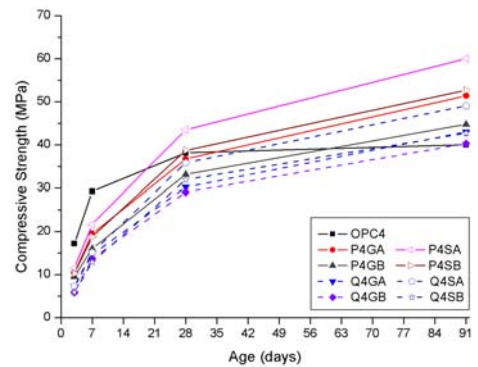


Fig. 11 재령에 따른 압축강도(Wc/C=0.45)

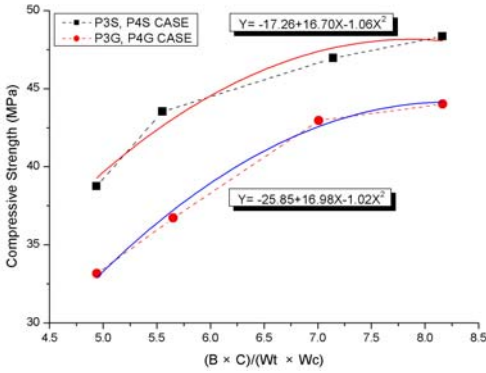


Fig. 12 압축강도 추정(P CASE)

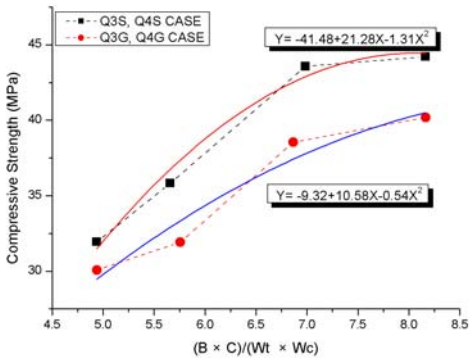


Fig. 13 압축강도 추정(Q CASE)

Table 6 28일 압축강도 추정식

CASE	Aggregate	Regression Equation	Dependency R ²
P	S	$y = -1.06x^2 + 16.70x - 17.26$	0.92
	G	$y = -1.02x^2 + 16.98x - 25.87$	0.98
Q	S	$y = -1.31x^2 + 21.28x - 41.48$	0.93
	G	$y = -0.54x^2 + 10.58x - 9.32$	0.89

Y : f_{28} (MPa)

X : $((C + FA) \times C) / ((W_c + W_f) \times W_c) = (B \times C) / (W_t \times W_c)$

Fig. 12과 Fig. 13은 본 연구에서 제안한 배합 방법으로 28일 압축강도 추정을 위한 강도와 상관요소들의 관계를 나타내었다. Table 6은 골재와 치환방법에 따른 28일 압축강도 추정식을 제시하였다.

3.5 단위 용적질량

골재를 플라이애쉬로 치환한 실험에서 모든 시편은

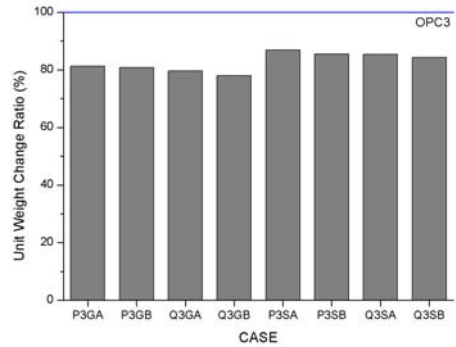


Fig. 14 단위질량 변화율(Wc/C=0.35)

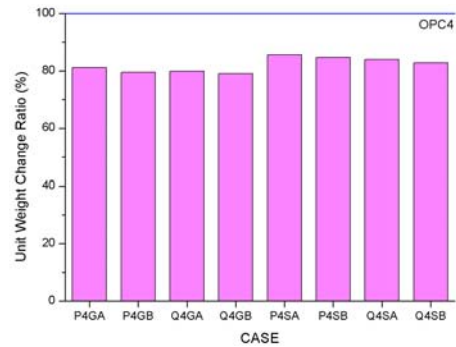


Fig. 15 단위질량 변화율(Wc/C=0.45)

OPC에 비해 단위용적질량이 감소한 것을 볼 수 있었다. 이는 골재보다 플라이애쉬의 밀도가 작기 때문으로 판단된다. Fig. 14와 Fig. 15에 나타난 바와 같이 굵은골재를 플라이애쉬로 치환한 경우(G CASE)는 18~22%의 질량 감소가 있었고, 잔골재로 치환한 경우(S CASE)는 13~17% 질량 감소 효과가 있었다. 또한 플라이애쉬와 첨가수량(W_f)의 중량 합이 골재의 중량과 같은 배합의 경우(P CASE)가 플라이애쉬와 골재의 중량이 같고 첨가 수량(W_f)을 추가한 배합의 경우(Q CASE)보다 질량 감소 효과가 더 컸다.

4. 결론

본 연구에서 제시한 플라이애쉬의 다량 골재 치환 콘크리트의 치환방법을 통해 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 골재를 플라이애쉬로 전량 치환할 경우 발생할 수 있는 유동성 및 강도 저하 등의 문제를 본 연구에

서 제시한 배합수량 첨가 방법 및 플라이애쉬 치환방법을 통하여 향상된 성능을 확보하는 것이 가능하였다.

- 2) 잔골재 치환의 경우(S CASE)는 굵은골재 치환의 경우(G CASE)보다 7.8 ~ 17.5%의 강도 증대가 있었고, 플라이애쉬와 첨가수량(W_f)의 중량 합이 골재의 중량과 같게 치환한 경우(P CASE)의 강도가 플라이애쉬를 골재 중량과 동일하게 치환하고 첨가수량(W_f)을 더한 경우(Q CASE)에 비해 9.5 ~ 17.6%의 강도 증대가 있었다.
- 3) 본 연구에서는 플라이애쉬와 첨가수량(W_f)의 합이 치환하는 골재의 중량과 같은 경우(P CASE)와 플라이애쉬와 치환하는 골재의 중량이 같고 첨가수량(W_f)을 추가한 경우(Q CASE)의 두 가지 치환방법을 제시하였다. 두 가지 치환방법에 따른 플라이애쉬 다량 치환 콘크리트는 첨가수량의 첨가를 통해 OPC보다 유동성을 향상시킬 수 있었고, 소요의 강도도 확보할 수 있었다. 또한 단위질량 감소효과도 있었다. 이는 본 연구에서 제시한 치환방법이 플라이애쉬 다량 치환 콘크리트의 개발에 유효하게 적용될 수 있음을 확인 할 수 있었다.
- 4) 추후 골재를 플라이애쉬로 다량 치환하는 콘크리트의 성능 개선을 위한 혼화제의 개발과 효과적인 배합방법의 선정을 통해 건설현장에서 요구하는 다양한 수준의 플라이애쉬 콘크리트를 제작하는데 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 플라이애쉬의 분말도, 구성성분, 강열감량 등의 성질을 개선하면 더 향상된 성능의 플라이애쉬 콘크리트를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 최세진, 권영진, 김무한, “플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 연구 및 실용화 동향”, 콘크리트학회지, 13권, 6호, 2001, pp.73~78.
2. 백민수, 정상진, “플라이애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 초기특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 18권, 11호, 2002, pp.91~98.
3. 이동화, 공민호, 백민수, 김성식, 이영도, 정상진, “플라이애쉬 다량 함유 콘크리트에 관한 실험적 연구”,

콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 13권, 2호, 2001, pp.1219~1224.

4. 이동하, 서동훈, 전판근, 백민수, 임남기, 정상진, “플라이애쉬를 대량 사용한 고강도 콘크리트 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 14권, 2호, 2002, pp.275~280.
5. 김무한, 권영진, 최세진, 강석표, 심제형, “플라이애쉬의 치환방법 및 치환율에 따른 플라이애쉬를 대량 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 18권, 2호, 2002, pp.123~130.
6. 조규환, 박무영, 백민수, 김우재, 임남기, 정상진, “플라이애쉬를 다량 사용한 콘크리트의 수화발열 특성과 압축강도 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 23권, 2호, 2003, pp.371~374.
7. 이동하, 김상미, 간태경, 백민수, 이영도, 정상진, “플라이애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 초기강도성상에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 14권, 2호, 2002, pp.281~286.
8. linhua Jiang, Baoyu Lin and Tuebo Cai, “Studies on Hydration in High-Volume Fly Ash Concrete Binders”, ACI Material Journal, Vol.96, Issue.5, 1999, pp.703~706.
9. Wilbert S. Langley, Georges G. Carrette, and V. M. Malhotra, “Structural Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ash”, ACI Material Journal, Vol.86, No.5, 1989, pp.507~514.
10. Alain Bilodeau and V. Mohan Malhotra, “High-Volume Fly Ash System : Concrete Solution for Sustainable Development”, ACI Material Journal, Vol.97, No.1, 2000.
11. Rafat Siddique, “Effect of fine aggregate replacement with Class F Fly ash On the mechanical properties of concrete”, Cement and Concrete Research, Vol.33, 2003, pp.539~547.
12. Rafat Siddique, “Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete”, Cement and Concrete Research, Vol.33, 2003, pp.1877~1881.
13. ACI Committee 226, “Use of Fly Ash in Concrete”, ACI Material Journal, Vol.84, No.5, pp.381~409, 1987.

(접수일자 : 2006년 2월 15일)