

플라이애쉬 경화체의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

조병원*¹⁾ 김영진* 박종빈*
*한양대학교 토목공학과

An Experimental Study on Mechanic properties of Hardened Fly-ash

Jo, Byung Wan*¹⁾, Kim, Yeung Jin*, Park, Jong Bin*
*Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791. Korea

요 약

이 논문의 목적은 산업부산물인 플라이애쉬의 재활용을 높이기 위해 플라이애쉬를 대량으로 사용한 플라이애쉬 경화체를 제작 하였다. 단위시멘트량의 90%를 플라이애쉬로 대체하여 제작한 이 경화체의 압축강도, 탄성계수 등 기초적인 물성을 파악하여 구조용 건설재료로 실용화하기 위한 기초적 자료를 제시하고자 한다. 물-시멘트비를 변수로 하여 플라이애쉬 경화체의 휨강도를 측정된 결과 물-결합재비, 잔골재율이 증가할수록 파괴에너지가 감소하였다. 이러한 이유는 파괴에너지가 강도의 영향을 크게 받기 때문으로 판단된다. 이번 실험으로 플라이애쉬 경화체의 기초물성은 기존 콘크리트에 많이 접근했음을 알 수 있었다. 하지만 구조용 건설자재로 도입되기 위해서는 건조수축, 크리프, 동결융해 등의 내구성 실험도 계속 수행되어야 할 것이다.

핵심용어: 플라이애쉬, 파괴에너지, 압축강도, 탄성계수, 물-결합재비, 잔골재율

ABSTRACT

The purpose of this paper is to recycle the fly ash to the valuable resources and settle environment problems which was caused by the fly ash produced from the thermal power plant. Making the fly ash-cement matrix reused fly ash in large quantities, we looked into minutely the physical properties - the elastic modulus, the compressive strength - to increase the usefulness as the building materials for the structure widely. In this paper, the variables are the water-binder(39, 42, 45%), the fine aggregate ratio(37, 41, 45%). Because the fracture energy is influenced by the strength, it is showed to decrease with the increase of W/B and S/a. Besides, we will be able to know that basic properties of the fly ash-cement matrix are similar to that of concrete. But, it is needed to carry out durability experiment on the drying shrinkage, creep, freezing and thawing test to use structural materials.

Keywords: fly ash, fracture energy, compressive strength, elastic modulus, water-binder ratio, fine aggregate ratio

1. 서 론

우리나라 경제 발전의 원동력이 되는 천연자원의 대부분을 수입해야 하는 현 시점에서 새로운 대체자원으로의 방안이 시급하다. 현재 화력 발전소에서 발생되어지는

석탄회 재활용률이 50%에도 못 미치고 있고, 대부분 폐기하고 있다.

이 중 플라이애쉬는 콘크리트용 시멘트 대용으로 사용할 수 있는 포졸란(Pozzolan) 특성이 있어, 오래 전부터 전 세계적으로 플라이애쉬 재활용에 관한 연구가 이루어져 왔다. 하지만 계속되어진 연구에도 불구하고 대부분 소성방법을 이용한 플라이애쉬 제품은 경제성에 맞지 않아서 그 재활

1) Corresponding author

Tel : 02-2290-0327 Fax: 02-2292-0321
E-mail : ecosee@hanmail.net

용분야가 시멘트의 대체제, 충전재등의 극히 일부에서 사용되어지고 있다.

이에 본 연구에서는 플라이애쉬 경화체를 제작하여, 재령별 강도발현과정을 규명하고, 압축강도 및 탄성계수 실험 및 3점 휨강도 실험을 실시하여, 플라이애쉬 경화체를 토목, 건축 구조분야에 실용화하기 위한 기초자료를 제시하는데 목적이 있다.

2. 실험계획 및 실험방법

2.1 실험재료

2.1.1 플라이애쉬 및 시멘트

플라이애쉬는 충남 당진 화력발전소에서 발생하는 유연탄 플라이애쉬를 사용하였다. 플라이애쉬의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다. 강도증진제로 사용한 시멘트는 KS F 5201에 규정된 규격을 만족하는 H사의 보통포틀랜드시멘트로서 비중은 3.15, 분말도는 $3,341 \text{ cm}^2/g$ 를 사용하였다.

Table 1 Physical & chemistrical properties of fly ash

구 분	강열감량 (%)	분말도 (cm^2/g)	비중	SiO ₂ (%)
충남당진	3.5	3,765	2.20	57.4

2.1.2 골재

골재는 비중 2.6, 조립률 2.9인 강모래를, 굵은 골재는 최대치수 13mm이고 비중이 2.69, 조립률이 6.2인 쇄석을 사용하였다.

2.1.3 혼화재료

플라이애쉬와 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 반응성을 증가시키고 플라이애쉬에서 실리카의 용해속도를 증가시키기 위하여 액상형태의 NaOH 및 분말형태의 CaO 를 사용하였고, 이 반응의 촉매제로 분말형태의 MnO_2 를 첨가하였다. 또한 액상형태의 Na_2SiO_2 를 사용

하여 자체경화 및 플라이애쉬 반응성 증가를 통한 강도증진을 유도하였다. Table 2에 혼화재의 물리적 성질을 나타내었다.

Table 2 Physical properties & kinds of admixtures

성분	유 형	비 중	비 고
CaO	분 말	1.0	
MnO_2	분 말	1.0	
NaOH	액 상	1.36	67% 희석
Na_2SiO_2	액 상	1.38	60% 희석

2.2 실험변수

본 연구에서는 예비실험을 통하여 도출된 FW1-S1을 기준으로 물-결합재비와 잔골재율에 따른 건조수축 특성, 탄성계수 및 재령별 강도발현 양상 등을 알아보았다. 단위수량은 $190 \text{ kg}/m^3$ 으로 고정하고, 단위시멘트량의 90%를 플라이애쉬로 치환하였다. 또한 변수로는 물-결합재비(39, 42 및 45%), 잔골재율(37, 41 및 45%)을 사용하였으며, 혼화재는 Table 3에서 제시한 바와 같이 플라이애쉬 중량대비로 사용하였다. 휨강도 실험에서 물-결합재비와 잔골재율의 변화를 통해 물-결합재비 및 잔골재율의 변화와 휨강도의 관계를 파악하고자 하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 압축강도 실험

압축강도 실험은 ASTM C109/C109M-95에 규정된 방법에 따라 Axial strain 측정용 Compressonmeter를 구비한 MTS사의 만능시험기를 사용하여 실시하였다. 매초 $0.2\text{N}/\text{mm}^2$ 의 속도로 재하하여 파괴시의 최대하중을 측정하였다. 또한 압축강도 측정과 동시에 정탄성계수 측정을 ASTM C 469-94 규정에 따라 실시하였다.

Table 3 Mixture proportion of fly ash-cement matrix

Type	G _{max} (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					Admixtures(kg/m ³)			
				W	FA	C	S	G	CaO	MnO ₂	NaOH	Na ₂ SiO ₂
FW1-S1	13	39	37	190	443	44	352	621	22.1	44.3	132.9	88.6
FW1-S2			41				390	581				
FW1-S3			45				429	542				
FW2-S1		42	37		411	41	383	674	20.6	41.1	123.4	82.3
FW2-S2			41				424	632				
FW2-S3			45				466	589				
FW3-S1		45	37		384	38	409	721	19.2	38.4	115.2	76.8
FW3-S2			41				454	675				
FW3-S3			45				498	629				

2.3.2 휨파괴 실험

휨파괴 실험은 ASTM C 293-94의 규정에 의해 실험체를 제작하여 실시하였다. 휨파괴 실험의 변수는 배합비 이외에 100×100×400 mm(순지간 300 mm)의 휨실험체에 실험체 깊이에 대해 인위적인 폭 3 mm의 노치를 높이의 0.0, 0.3, 0.5의 비율로 정하였다.

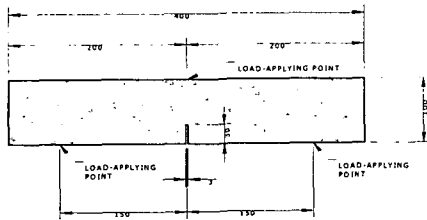


Fig. 1 Dimension of specimen for bending test (Notch 3 cm)

휨파괴 실험은 안정적인 균열성장을 유도하기 위하여 CMOD 변위제어법을 이용하며, 총 용량이 37.5 mm인 COD gage의 제어속도는 0.1mm/min으로 휨하중이 0이 될 때까지 실험을 연속적으로 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축강도

재령과 압축강도와의 관계를 로그함수로 회귀분석을 실시한 결과는 Fig.2와 같다.

본 연구의 실험 배합비인 FW1-S1 실험체의 압축강도를 로그함수로 회귀 분석한 결과 도출된 제안식은 다음과 같다. 제안식과 측정값과의 상관계수는 0.979로 매우 높게 나타났다.

$$y = 176.93 \cdot x^{0.209}$$

여기서, x : 재령(일)

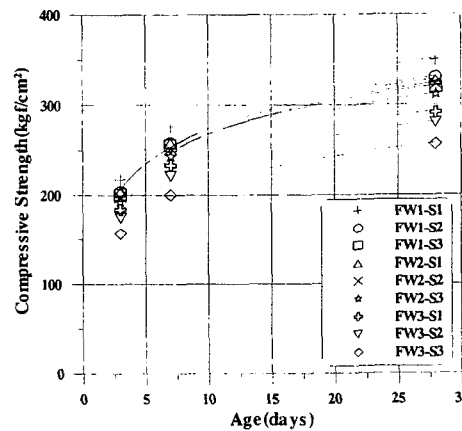


Fig. 2 Compressive strength and regression analysis

또한, 시험체 FW1-S1~FW2-S3은 300 kgf/cm² 이상을 보이고 있어 구조용 부재료의 실용 가능한 수준으로 나타났다. FW1~FW3 계열을 관찰해 보면 물-결합재비가 증가할수록 압축강도는 10~20 kgf/cm²씩 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 물-결합재비가 증가할수록 강도증진에 사용되는 단위시멘트량이 감소하여 강도가 저하되는 것으로 판단된다. 또한 S1~S3계

열을 관찰해 보면 잔골재율이 증가할수록 압축강도가 저하되는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 잔골재율이 증가함에 따라 강성이 큰 굵은 골재의 양이 줄어들기 때문으로 판단되어진다. 한편 재령 28일에 극한하중의 40%에서 탄성계수 실험 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Elastic modulus of the flyash-cement matrix
(Unit:kgf/cm²)

Type	E	Type	E	Type	E
FW1S1	213,19	FW2S1	203,49	FW3S1	145,67
FW1S2	162,65	FW2S2	209,97	FW3S2	130,55
FW1S3	138,08	FW2S3	147,15	FW3S3	100,34

3.2절의 결과를 고려하여 관찰하면 FW1~FW3 계열 공시체의 극한변형률은 0.002~0.004의 값을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 플라이애쉬 경화체의 변형률이 극한변형률이 0.003인 일반 콘크리트의 탄성계수에 근접함을 알 수 있다.

3.2 하중-균열개구변위(CMOD) 특성 평가

하중-균열개구변위 곡선은 S/a, W/B 및 노치비에 따라 거의 모든 경우 흡사한 모습으로 분포되어짐을 볼 수 있었다.

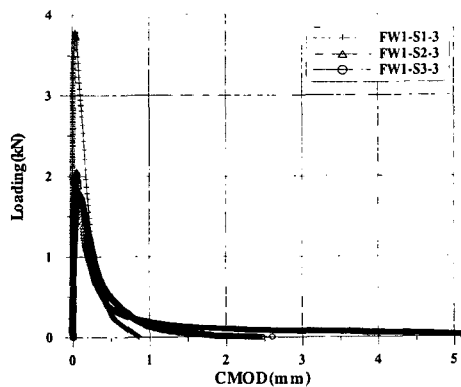


Fig. 3 Relation between load and CMOD by S/a

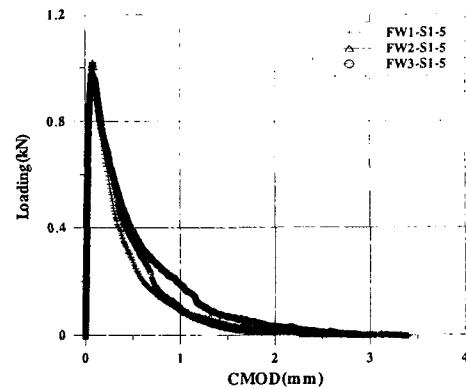


Fig. 4 Relation between load and CMOD by W/B

하중-균열개구변위 곡선에서 하중에 대한 강성은 S/a 및 W/B가 증가할수록 낮아짐을 볼 수 있었다. 또한 균열개구변위가 약 0.1 mm 되는 지점에서 최대하중점이 됨을 볼 수 있었다. 노치비에 따른 하중-균열개구변위 곡선은 역시 양상은 비슷하며, 노치가 3 cm일 때가 5 cm일 때보다 더 높은 하중에서 건디는 현상을 보이면서 최대하중 이후의 균열개구변위가 더 작음을 볼 수 있었다. 이것은 최대하중 이후의 처짐이 작아지므로 인한 것으로 판단되어진다. 또한 초기 노치비가 증가함에 따라 비록 강성과 하중 전달능력은 감소하나, 최대하중 이후에 있어서의 하중-균열개구변위 곡선의 (+)기울기로의 변화현상이 둔화되고 있음을 알 수 있었다.

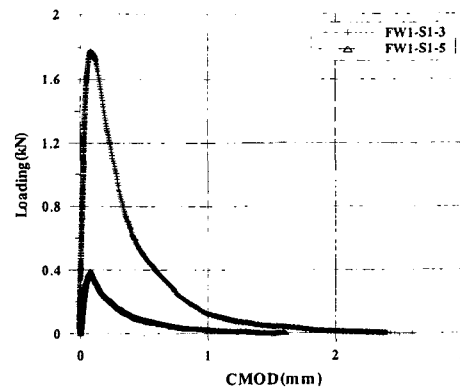


Fig. 5 Relation between load and CMOD by notch ratio

3.3 파괴에너지(G_F)

각 변수별 파괴에너지는 Fig. 6에서 보듯이 노치비가 작을수록, S/a 및 W/B가 작을수록 파괴에너지의 값은 커지는 경향이 있었다. FW1-S1과 FW3-S3의 파괴에너지 값은 약 2.5배의 차이를 보였다. 이것은 W/B와 S/a의 양이 많은 경우 파괴시의 최대하중이 낮음과 관계 있다고 할 수 있다. 같은 조건하에서는 3 cm 노치가 있는 경우 노치가 없는 실험체 파괴강도의 약 60%, 5 cm 노치가 있는 경우는 약 40%의 파괴에너지 값이 측정되었다. 즉, 노치비가 작을수록 실험체의 강도는 높게 나타나고 이에 따라 파괴에너지의 값도 높아짐을 알 수 있다. 이것은 초기의 인위적 노치의 존재부분에서 하중을 받을 때 높은 응력집중현상이 발생하기 때문이라고 판단된다.

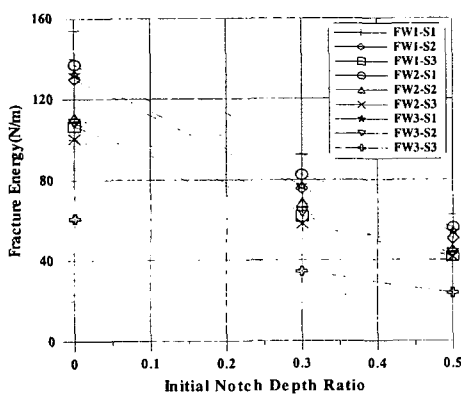


Fig. 6 Fracture energy

4. 결론

본 연구는 플라이애쉬 경화체의 파괴에 대한 일반적인 파라메타를 구하기 위해 S/a, W/B 및 노치비에 따른 파괴특성을 구한 것으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 재령별 압축강도는 재령 3일의 강도가 28일 강도의 약 70%로 나타났으며, 로그함수로 회귀분석 결과, $y=176.93 \cdot x^{0.209}$ 의 제안식이 도출되었고, 상관계수는 0.979로 높게 나타났다.

2. 정탄성계수 측정 결과, 비슷한 강도의 콘크리트의 75% 정도로써, 압축강도에 비해 탄성계수가 작았다.
3. 하중-CMOD의 곡선에서 각 배합에 대해 모두 비슷한 형태를 보였다. 또한 W/B, S/a 및 노치비가 작을수록 파괴시의 처짐은 감소하였다. 그리고 최대하중 이후의 곡선의 기울기가 (+)로 변화현상이 둔화되는 경향을 보이는데, 이는 플라이애쉬 경화체가 취성적인 성질을 가지고 있기 때문으로 판단된다.
4. 파괴에너지(G_F)는 W/B, S/a 및 노치비가 클수록 값이 감소하는 경향이 있다. 이는 파괴에너지가 강도의 영향을 크게 받고 있는 것으로 판단되며, 일반 콘크리트와 비교시 약 3/5에 해당하는 값을 가지는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. D.Zhang, "Fracture process zone of notched three-point-bending concrete beams". Cement and Concrete research 29, 1999, pp.1887~1892
2. Qian Jueshi and Luo Hui, "Size Effect on Fracture Energy of Concrete Determined by Three-point-bending". Cement and Concrete research vol.27, 1997, pp.1031~1036
3. 장동일, "구조공학에서의 파괴와 피로". 동명사
4. 손영현, "강섬유보강 고강도콘크리트의 파괴특성에 관한 연구" 한양대학교 대학원, 1999, pp.14~36
5. Mihashi, H., Nomura, N. and Niiseki, S.(1991), "Influence of Aggregate Size on Fracture Process Zone of Concrete detected with Three Dimensional Acoustic Emission Technique," Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp.737~744
6. Nallathambi, P. and Karihaloo, B. L.(1986), "Determination of Specimen-Size Independent Fracture Toughness of Plain Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol. 38, No. 135, pp.67~76