

저강도 플라이애시-시멘트 복합체의 내구특성

Durability Characteristics of Low Strength Fly ash-Cement Composites

원 종 필*

신 유 길**

이 용 수***

안 태 송****

Won, Jong Pil

Shin, You Gil

Lee, Yong Su

An, Tae Song

ABSTRACT

Durability characteristics of controlled low strength material(flowable fill) with high volume fly ash content was examined. The mix proportions used for flowable fill are selected to obtain low-strength materials in the 10 to 15kgf/cm² range. The optimized flowable fill was consisted of 60 kgf/m³ cement content, 280kgf/m³ fly ash content, 1400kgf/m³ sand content, and 320kgf/m³ water content. Subsequently, durability tests including permeability, warm water immersion, repeated wetting & drying, freezing & thawing for high volume fly ash-flowable fill are conducted. The test results indicated that flowable fill has acceptable durability characteristics.

1. 서 론

본 연구에서 다룬 고유동충전재는 산업부산물인 플라이 애시의 양을 최대로 늘리고, 경제적인 이유로 시멘트의 양을 최소로 한 저강도의 고유동성을 가진 재료이다. 본 재료는 기존의 입상충전재를 대체하여 우수한 시공성을 발휘하는 장점을 가지지만, 물리·화학적 침식이나 동결융해 등에 저항하도록 설계되지는 않았다. 이러한 이유로 고유동충전재는 고품질을 요구하는 구조적인 부재에 적용되기 보다 주로 토질과 접하는 지하의 공극을 메우는 저강도의 비구조적인 분야에 적용될 수 있다. 고유동충전재가 적용되는 분야를 살펴보면, 높은 유동성 및 낮은 압축강도를 가지고 있어 다짐이 어려운 지역이나 시공이 어려운 지역, 또는 장래에 굴착이 예상되는 지역에 시공이 가능하다. 이는 굴착으로 인한 주변시설물의 안전을 고려한 지하시설물의 충전, 파이프의 하부충전, 지하수의 오염을 방지하기 위한 폐공의 충전, 그리고 지반 침하 및 환경오염원인 폐광 등의 충전에 효과적으로 사용할 수 있다.

본 연구에서 다량의 플라이 애시를 사용한 저강도 고유동충전재의 내구특성 실험은 기본적인 물성시험을 거친 최적배합비(시멘트: 60 kgf/m³, 플라이 애시: 280 kgf/m³, 모래: 1400 kgf/m³, 물: 320kgf/m³)에 대해 충전대상 및 시공환경 등의 상황을 고려하여 투수성, 더운물침지, 건조-습윤반복, 동결융해시험 등의 내구성능을 평가하기 위한 촉진 실내시험을 실시하였다.

* 정회원, 건국대학교 농공학과 교수

** 정회원, (주)한림에코텍 제품개발부

*** 건국대학교 농공학과 석사과정

**** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실장

2. 사용재료

1) 시멘트 및 골재

시멘트는 보통 포틀랜드시멘트(Type I)를 사용하였으며 잔골재는 표면건조포화상태 비중 2.61의 강사를 사용하였다.

2) 플라이애시

플라이 애시는 KS 규정에서 제시한 SiO₂ 45% 이상, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ 70% 이상을 만족했다.

3. 내구특성 실험

3.1 투수특성

투수성시험은 $\phi 36 \times 72\text{mm}$ 공시체를 사용하여 재령 28, 56, 91, 180일에서 연성벽체 투수시험기를 이용하여 재령별 3개씩 실시되었으며 측정 실험결과는 Table 1 및 Fig.1 과 같다.

Table 1 Permeability of flowable fill (unit : cm/sec)

No.	28 days	56 days	91 days	180 days
1	1.33×10^{-9}	1.14×10^{-9}	5.75×10^{-9}	4.97×10^{-9}
2	9.95×10^{-9}	8.17×10^{-9}	5.98×10^{-9}	5.26×10^{-9}
3	9.75×10^{-9}	8.93×10^{-9}	5.35×10^{-9}	5.29×10^{-9}
Ave. (std. dev.)	1.1×10^{-8} (1.15×10^{-9})	9.5×10^{-9} (0.98×10^{-9})	5.69×10^{-9} (0.2×10^{-9})	5.17×10^{-9} (0.1×10^{-9})

3.2 더운물침지

재령이 각각 28일, 56일, 91일인 공시체를 50℃의 물속에 15일 및 60일 동안 침지시킨 후 재령별 3개씩의 압축강도를 측정하였으며 상온(23℃)의 수중에서 양생된 같은 재령을 가지는 공시체(Control)의 압축강도와 비교하였으며 실험결과는 Table 2 및 Fig. 2와 같으며, Fig. 3은 세 가지 재령(28, 56, 91일)의 공시체에 대한 15일 및 60일의 더운물침지와 수중양생 후의 성분변화를 분석하기 위해 X선 회절(X-Ray Diffraction) 분석을 실시한 것이다

Table 2 Warm water immersion (unit : kgf/cm²)

Specimen		28 days		56 days		91 days	
		Strength	Average	Strength	Average	Strength	Average
After 15 days	Warm water	56.96	57.27 (0.50)	37.44	37.68 (0.17)	41.32	40.77 (0.49)
		56.60		38.00		41.20	
		58.24		37.60		39.80	
	Control	20.00	19.80 (0.12)	20.48	20.83 (0.21)	19.72	21.44 (0.88)
		19.60		20.80		22.01	
		19.80		21.20		22.59	
After 60 days	Warm water	86.12	84.59 (0.78)	68.76	67.85 (0.52)	70.96	69.11 (0.96)
		83.64		66.96		68.64	
		84.00		67.85		67.73	
	Control	25.92	25.83 (0.14)	27.96	26.52 (0.73)	28.54	27.03 (0.77)
		26.00		26.00		26.02	
		25.56		25.60		26.53	

() standard deviation

3.3 건조-습윤 반복시험

본 연구에서의 건조-습윤 반복시험은 더운물침지에 의한 촉진시험과 동일한 공시체(재령 28일, 56일, 91일 공시체)를 사용하여 8 및 34사이클(재령 16, 68일)에서 재령별 3개씩의 압축강도 및 중량을 측정하였으며, 상온(23℃)의 수중에서 양생된 공시체의 압축강도와 비교하였으며 실험결과는 Table 3 및 Fig 4와 같다. Table 3 및 Fig. 4에서 건조-습윤반복으로 인한 고유동 충전제의 파괴는 없었으며 반복횟수가 증가될수록 오히려 강도가 증가되었는데, 전체적으로 재령 56일 공시체의 강도 증가수준이 가장 높았다. 한편, 각 재령의 공시체에 대한 8 및 34 사이클에서의 중량변화(Δ)는 Table 4 및 Fig. 5과 같다.

Fig. 5에서 28일 공시체와 비교하여 재령 91일 공시체의 중량변화가 다소 컸는데, 이는 Fig. 4의 건조-습윤 반복시험의 압축강도 증가수준이 재령 91일 공시체에서 가장 낮은 것과 연관시킬수 있다. 즉 공시체 내의 어떤 물질이 생성되어 공시체의 강도발현을 감소시키면서 중량을 증가시켰음을 알수 있는데, 이러한 화학변화는 Fig. 6에서 알수 있다.

Table 3 Test results of repeated wetting and drying cycles (Unit : kgf/cm²)

Specimen		28 days		56 days		91 days	
		Strength	Average	Strength	Average	Strength	Average
After 8 cycles	Wetting and drying	50.12	49.45 (0.38)	54.00	52.19 (0.96)	39.16	42.36 (2.13)
		48.80		51.84		41.40	
		49.44		50.72		46.36	
	Control	20.00	19.80 (0.12)	20.48	20.83 (0.21)	22.02	21.44 (0.65)
		19.60		20.80		20.15	
		19.80		21.20		22.15	
After 34 cycles	Wetting and drying	63.68	63.72 (0.54)	67.56	66.32 (1.20)	54.76	56.87 (1.07)
		64.68		63.92		57.63	
		62.80		67.48		58.22	
	Control	26.60	26.69 (0.27)	28.82	27.00 (0.92)	26.26	27.12 (0.58)
		27.20		25.86		26.87	
		26.28		26.32		28.23	

() standard deviation

Table 4 Weight of after repeated W&D (Unit : gf)

Specimen		28 days		56 days		91 days	
		Weight(Δ)	Average	Weight(Δ)	Average	Weight(Δ)	Average
After 8 cycles	0.845	0.827 (0.014)	0.778	0.752 (0.013)	0.78	0.7 (0.04)	
	0.837		0.736		0.68		
	0.799		0.742		0.64		
After 34 days	1.325	1.283 (0.023)	2.18	1.91 (0.14)	2.37	2.25 (0.06)	
	1.247		1.82		2.22		
	1.277		1.73		2.16		

() standard deviation

3.4 동결융해시험

본 연구의 동결융해시험은 KS F 2456의 B법인 기중동결(-18℃), 수중융해(5℃)법에 따라 실시되었는데, 1사이클의 소요시간은 3~4시간이었다. 공시체는 10×10×40cm의 각주를 사용하였으며 시험개시체령은 14일을 기본으로 하였다. 실험방법은 낮은 동결융해 저항성을 가지는 고유동충전제의 특성을 감안하여 2사이클마다 표건상태 공시체에 대한 상대동탄성계수 및 중량을 측정하였다.

고유동충전제에 대한 동결융해 실험결과는 Table 5 및 Fig. 7과 같다. 표에서 동탄성계수는 표건상태에서 시간의 경과에 따라 세 번 측정된 값을 평균하였다.

Table 5 Transverse frequency after freezing and thawing

Cycle	0	2	4
Average	2.008	2.238	2.183
Relative dynamic modulus of elasticity(%)	100	112	110

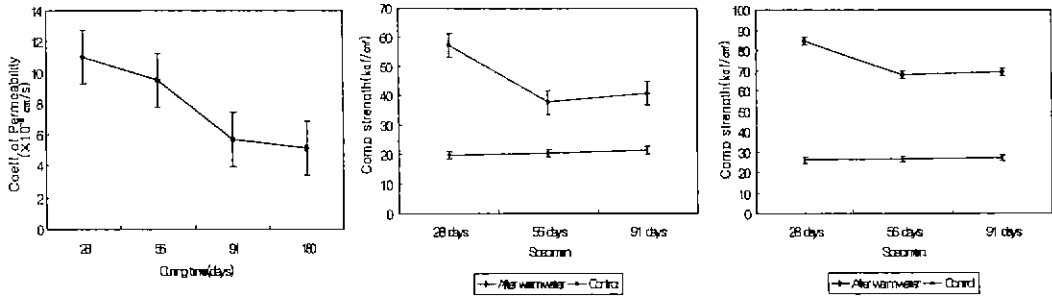


Fig. 1 Permeability of flowable fill

a) After 15 days

Fig 2 Comp. strength after warm water immersion

b) After 60 days

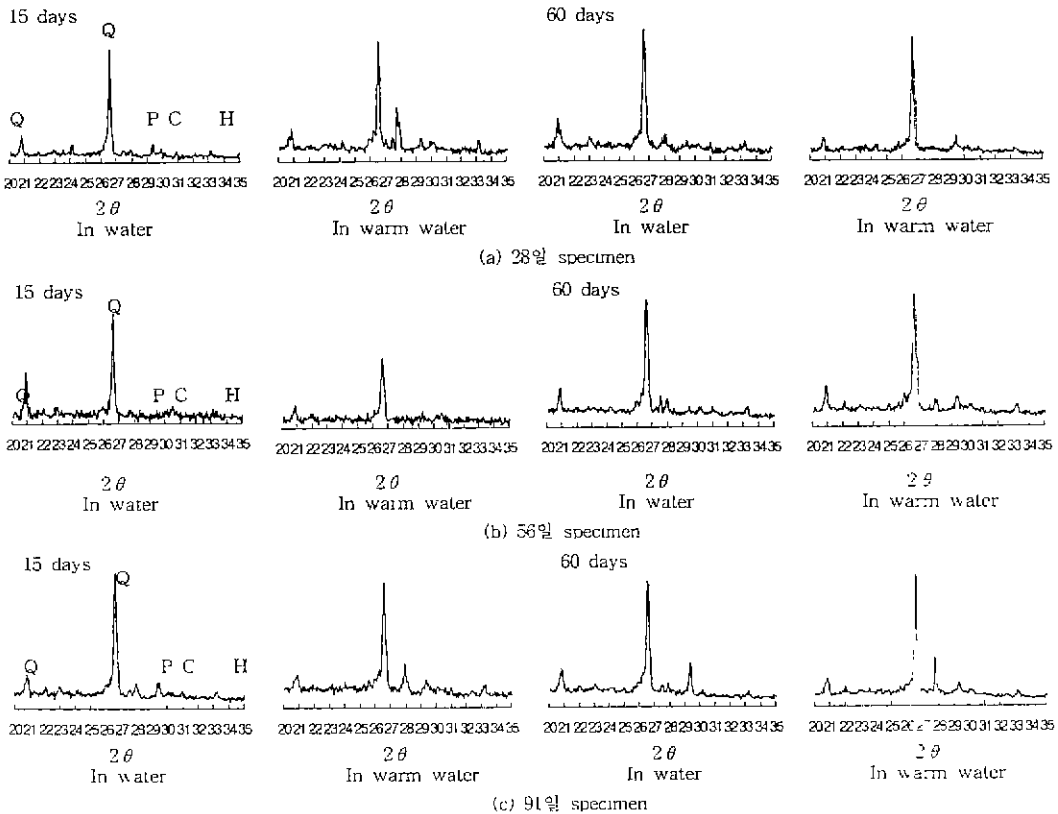
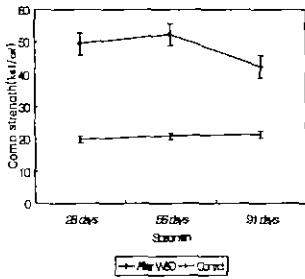
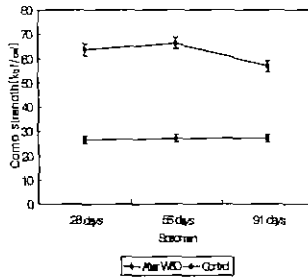


Fig 3 XRD analysis for warm water immersion

(a) 28 days specimen, (b) 56 days specimen, (c) 91 days specimen(Q: Quartz, P: Portlandite, C: Ca-cite, H: Hemattite)



(a) 8 cycles



(b) 34 cycles

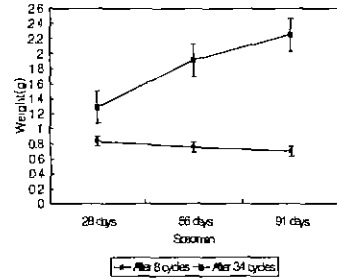


Fig. 5 Weight after repeated wetting and drying

Fig. 4 Comp. strength after repeated wetting and drying

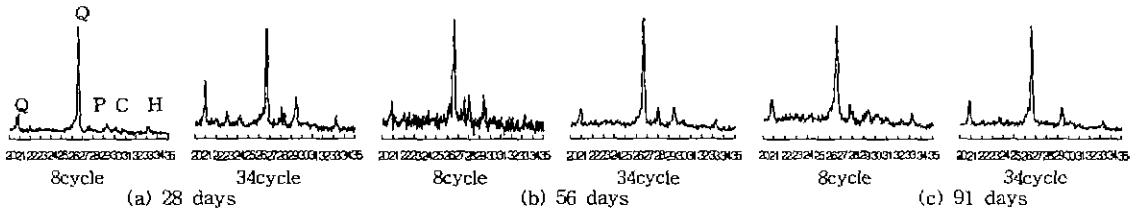


Fig. 6 XRD analysis after repeated wetting and drying;

(a) 28 days, (b) 56 days, (c) 91 days (Q: Quartz, P: Portlandite, C: Calcite, H: Hematite)

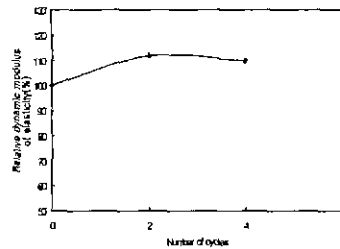


Fig. 7 Relative dynamic modulus of elasticity

4. 결 론

본 연구는 산업부산물인 플라이 애시를 다량으로 사용하여 저강도의 비구조적인 부재에 적용이 가능한 고유동충전재의 내구특성을 실험적으로 규명한 것으로 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

1) 고유동충전재의 내구특성 실험결과 투수성은 토질에서의 불투수성에 해당되었으며, 일반적인 고유동충전재의 투수계수(5×10^{-6} cm/sec) 보다 낮은 10^{-9} cm/sec로 내구성에 유리한 영향을 미칠 것으로 기대할 수 있다.

2) 더운물침지의 실험결과 고유동충전재는 충분한 수분의 공급 및 지속적인 시멘트의 수화반응이 가능할 경우 장기재령에서도 강도증진이 계속될 수 있음을 보여주었다.

3) 건조-습윤 반복시험에서 각 재령(28일, 56일, 91일) 공시체의 중량변화는 압축강도 증가와 상반된 경향을 나타냈다.

4) X선 회절분석을 통해 재령 28일 및 56일 공시체의 경우 8사이클과 34사이클 모두에서 P(Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) 성분이 존재하였으나, 수화반응이 거의 끝난 재령 91일 공시체의 경우에는 34사이클에서 P 성분이 존재하지 않음을 볼 수 있다. 재령 91일 공시체는 P 성분이 소모됨으로써 Q(Quartz, SiO_2)가 생성되어 중량의 증가수준은 가장 높았지만 과도한 생성으로 인한 내부팽창으로 강도발현에는 불리하게 작용한 것으로 사료된다.

5) 고유동충전재에 대한 동결융해 시험결과 2사이클에서부터 균열이 관찰되었으며 6사이클에서는 측정이 불가능하였는데, 측정된 동탄성계수 및 중량 모두 자체의 낮은 동결융해 저항성을 보였다. 그러나 점토보다 낮은 투수성을 가지는 고유동충전재가 높은 투수성을 가지는 재래의 입상충전재에 비해서는 좋은 거동을 보일 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 정재동, 콘크리트재료공학, 보성각, 1998, pp. 305~336
2. 문한영, 서정우, 콘크리트 혼화재료, 한국콘크리트학회·편, 1997, pp. 186~216
3. 김영근, 박유신, "플라이애쉬의 건자재 활용화 방안", 건자재 가을호, 통권 11호, 1997, pp. 255~269
4. Bruce W. Ramme, "Progress in CLSM : Continuing innovation", Concrete International, May, 1997, pp. 32~33
5. M.H. Maher and P.N. Balaguru, "Properties of flowable high-volume fly ash-cement composite", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.5, No.2, May, 1993, pp. 212~225