
다량의 플라이 애쉬를 사용한 저강도 고유동 충전재의 내구특성에 관한 연구

Durability Characteristics of Controlled Low Strength Material (Flowable Fill) with High Volume Fly Ash Content



원 종 필*
Won, Jong-Pil



신 유 길**
Shin, You-Gil

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine the durability characteristics of controlled low strength material(flowable fill) with high volume fly ash content. Flowable fill refer to self-compacted, cementitious material used primarily as a backfill in lieu of compacted fill. The two primary advantages of flowable fill over traditional methods are its ease of placement and the elimination of settlement. Therefore, in difficult compaction areas or areas where settlement is a concern, flowable fill should be considered. The fly ash used in this study met the requirements of KS L 5405 and ASTM C 618 for Class F material. 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 60kg f/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 results indicated that flowable fill has acceptable durability characteristics.

Keywords : durability, flowability, flowable fill, fly ash, strength

* 정희원, 건국대학교 농공학과 조교수

** 정희원, 건국대학교 농공학과 석사과정

·본 논문에 대한 토의를 2000년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

건설재료의 내구성이란 장기간에 걸친 외부환경으로부터 물리·화학적 작용에 저항하는 재료의 성능을 말하며, 처음의 설계조건과 같이 성능이 저하되지 않고 원래 재료성질(성능)이 유지되는 성질을 말한다.⁽¹⁾ 고유동충전재는 시멘트, 플라이 애쉬, 모래, 물로 구성된 타설시 높은 유동성을 가지는 결합성 재료이다. 미국콘크리트학회 229년 소위원회(ACI Committee 229)에 의해 압축강도가 8.3 MPa(85kgf/cm²)만 넘지 않으면 고유동충전재로 분류되지만, 일반적으로 장래의 굴착성을 고려하는 경우 인력에 의한 굴착은 3 kgf/cm²이하, 백호 같은 장비에 의한 굴착은 7~14 kgf/cm² 정도의 압축강도가 요구된다. 아울러 필러로써 잔골재나 플라이 애쉬를 사용한 고유동충전재는 20 kgf/cm²의 강도에서도 백호로 굴착이 가능하다.^(4,9) 고유동충전재의 내구성은 재료를 둘러싼 주위환경이나 자체의 내적인 원인에 의해 저하되는데, 외적요인으로는 물리적, 화학적 혹은 기계적인 것 즉, 기상작용, 온도의 영향, 마모, 전해작용 및 천연 혹은 공업적인 액체나 가스의 침식에 의한 것 등이 있다. 또한 보호되지 않은 고유동충전재는 가혹한 환경조건하에서 성능이 저하되고 이러한 원인에 의해 발생하는 손상의 정도는 고유동충전재 자체의 품질에 의해서 크게 달라질 수도 있다. 내적 원인으로서 알칼리 골재반응, 골재와 시멘트 페이스트와의 열적 성질의 상위에 의한 체적변화, 혹은 고유동충전재의 투수성 등이 있다. 한편, 고유동충전재의 내구성 저하는 상술한 요인 중 단독의 원인에 의해 발생하는 예는 거의 없으며 대부분의 경우 몇 개의 요인이 복합적으로 영향을 미치므로 이러한 손상의 원인을 특정한 인자에 의한 것으로 단정하기는 어려운 경우가 많다.^(1,12,13)

본 연구에서 다룬 고유동충전재는 산업부산물인 플라이 애쉬의 양을 최대한 늘리고, 경제적인 이유로 시멘트의 양을 최소로 한 저강도의 고유동성을 가진 재료이며 기존의 입상충전재를 대체하여 우수한 시공성을 발휘하는 장점을 가지지만, 물리·화학적인 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.^(4,7,9,14) 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 지반침하 및 환경오염원인 폐광 등의 충전에 효과적으로 사용할 수 있다.

본 연구에서 다량의 플라이 애쉬를 사용한 저강도 고유동충전재의 내구특성 실험은 기본적인 물성시험을 거친 최적배합비(시멘트: 60 kgf/m³, 플라이 애쉬 :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.

2. 실험 개요

2.1 사용된 일반재료의 특성

본 연구에 사용된 시멘트는 S사의 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 강모래를 사용하였다. 품질시험 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Properties of cement

Fineness (cm ² /g)	Specific gravity	Stability (%)	Compressive strength(kgf/cm ²)		
			3 days	7 days	28 days
3.488	3.15	0.08	224	308	404
Initial setting time			231min.		
Final setting time			6h. 47min.		

Table 2 Properties of fine aggregate

Specific gravity			Fineness Modulus	Absorption (%)	Unit weight (kgf/m ³)
Bulk	Bulk(SSD)	Apparent			
2.587	2.604	2.63	2.99	0.67	1.624

Table 3 Physical and chemical properties of fly ash

Specific gravity		Fineness(cm ² /g)		Water content(%)		L.O.I(%)	
2.34		3.700		0.13		3.07	
SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	Na ₂ O(%)	K ₂ O(%)	SO ₃ (%)
52.0	27.01	3.93	7.85	1.92	0.58	0.73	0.13

Table 4 Properties of flowable fill

Setting time(hr)		Air content (%)	Unit weight (kg/m ³)	Slump flow (cm)	28 days compressive strength (kgf/cm ²)
Initial	Final	1	2,100	55	11.36
18	45				

2.2 플라이 애쉬의 특성

일반적으로 플라이 애쉬의 물리적 특성이 주로 굳지 않은 콘크리트의 거동과 관계가 있는 반면, 화학적 특성은 경화된 콘크리트의 성질에 미치는 영향이 크다.^(2,3) 본 연구에서 사용된 플라이 애쉬의 물리·화학적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3의 플라이 애쉬는 KS 규정에서 제시한 SiO₂ 45% 이상, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ 70% 이상을 만족했다. 시멘트의 자경성을 제공하는 주성분인 CaO는 일반적인 F급 플라이 애쉬가 5% 미만인데 비해 7.85%로 비교적 높았는데, 이는 시멘트와 유사한 수경성을 나타내는 동시에 포졸란 반응을 제공할 수 있다.⁽²⁾

2.3 고유동충전재의 특성

최적배합비(시멘트: 60 kgf/m³, 플라이 애쉬: 280 kgf/m³, 모래: 1400 kgf/m³, 물: 320 kgf/m³)에 대해 이루어진 고유동충전재의 여러 가지 재료특성은 Table 4와 같다.

3. 내구특성 실험

3.1 투수특성

흡수성이나 투수성이 적은 성질을 수밀성이라 하며, 이는 흡수시험이나 투수시험에 의해 판정된다. 설계의 불완전, 그 밖의 원인에서 구조물에 나타날 균열로부터 누수될 경우를 제외한다면 수밀성 저하의 원인은 거의 제조와 타설 및 다짐 등의 시공의 불완전에 있다. 타설 이후에 토질과 유사한 거동을 하는 고유동충전재에 대한 투수성 시험은 $\phi 36 \times 72$ mm 공시체를 사용하여 재령 28, 56, 91, 180일에서 연성벽체 투수시험기를 이용하여 재령별 3개씩 실시되었다.

연성벽체 투수시험은 시료포화를 위한 배압의 적용이 가능하고, 투수장비 안벽을 통한 유출이 거의 없어 정확한 투수계수를 구할 수 있다. 아울러 강성벽체 투수시험에 비해 배압적용에 의한 시료의 빠른 포화가 가능하므로 저투수성의 시료에 대해서도 상대적으로 투수시험 소요시간이 짧다.

Table 5 Permeability of flowable fill

(unit : cm/sec)

No.	28 days	56 days	91 days	180 days
1	1.33×10^{-8}	1.14×10^{-8}	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})

투수성 측정 실험결과는 Table 5 및 Fig. 1과 같다.

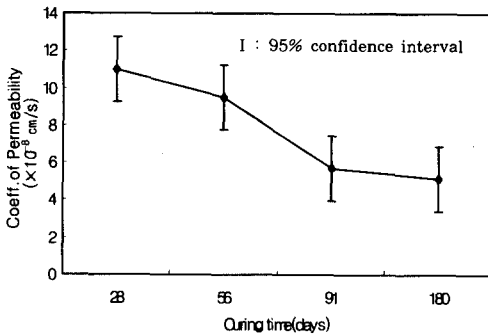


Fig. 1 Permeability of flowable fill

3.2 더운물침지

더운물 침지에 의한 촉진시험은 고유동충전재가 일반적으로 시공되는 지역과 비교하여 상대적으로 열을 많이 받게 되는 지역에 사용될 경우나, 장기재령에서 원래의 설계조건과 비교한 재료특성상의 변화여부를 알아보기 위해 실시되었다. 이는 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 비교하였다. 더운

물침지 실험결과에서 나타난 투수계수는 보통 토질에서 불투수성이라 분류되는 10^{-7} cm/sec 이하의 범위에 속했다. 이는 재령 28일 압축강도가 3.5~7kgf/cm²인 일반적인 고유동충전재의 투수계수 5×10^{-6} cm/sec 및 입상충전재로 주로 사용되는 실트질 모래의 투수계수 보다 낮은 것으로 동결융해 등의 내구성에 유리한 영향을 미칠 것으로 보인다. (5,8,12)

실험결과는 Table 6 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.

Fig. 2에서, 재령 28일 공시체의 경우가 더운물침지 후 압축강도의 증가수준이 가장 높았는데, 이는 수화정도가 다른 공시체에 비해 상대적으로 낮은 28일 공시체의 수화반응이 50℃의 수중에서 촉진되었기 때문으로 사료된다. 앞서 언급한 것처럼 처음의 설계조건과 같이 성능이 저하되지 않고 장기간 사용할 수 있는 재료를 내구적⁽³⁾이라고 할 때, 다량의 플라이 애쉬를 사용한 고유동충전재의 경우 상대적으로 강도증가 수준이 낮은 재령 91일 이후에서 장기거동을 평가하는 것이 바람직하다고 사료된다.

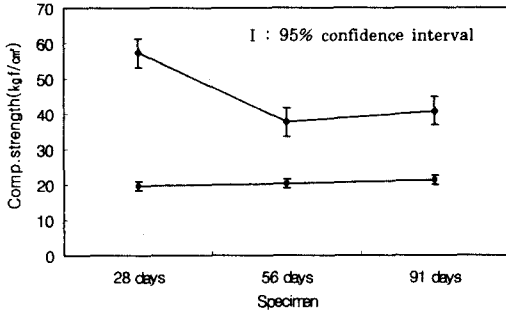
Fig. 3에서 재령 28일 공시체의 경우 더운물침지 후 촉진양생에 의한 시멘트의 수화반응으로

Table 6 Warm water immersion

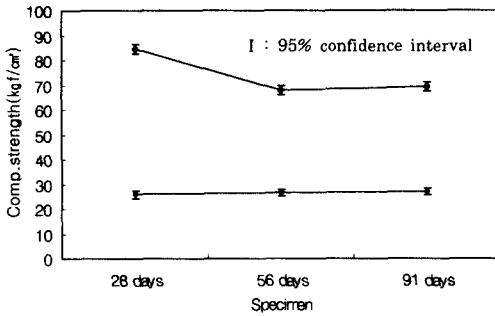
(unit : kgf/cm²)

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



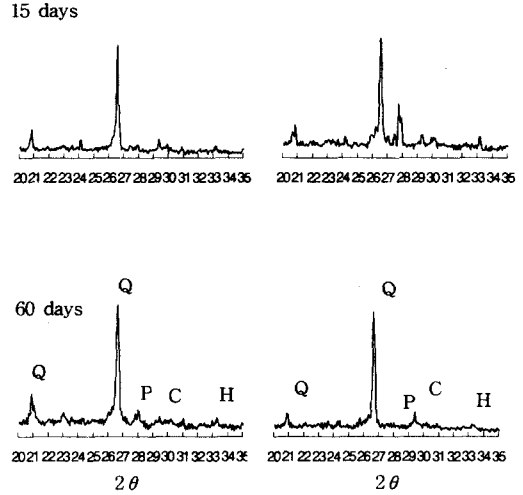
(a) After 15 days



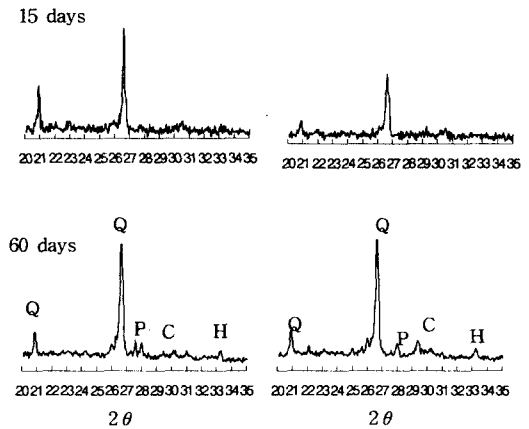
(b) After 60 days

Fig. 2 Comp. strength after warm water immersion

P(Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) 성분이 생성되어 재령 60일에서 플라이 애쉬와의 결합에 의하여 불용성의 안정한 규산칼슘수화물 등을 생성하는 포졸란반응으로 P 성분은 소실되고 Q(Quartz, SiO_2) 성분이 생성되었음을 알 수 있다. 아울러 어느 정도 수화가 진행된 재령 56일 및 91일 공시체의 경우에도 축진양생으로 인한 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 생성을 볼 수 있다. 이는 다량의 플라이 애쉬가 사용된 고유동충전재가 충분한 수분공급 및 지속적인 시멘트 수화반응이 가능한 환경에 노출될 경우 재령 91일 이상의 공시체에서도 플라이 애쉬와의 포졸란반응으로 인한 강도증진을 기대할 수 있음을 보여준다.



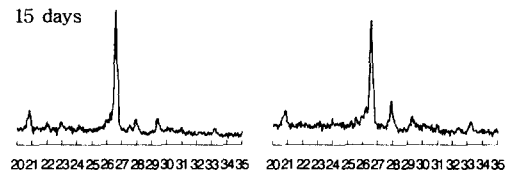
In water In warm water
(a) 28 days specimen



In water In warm water
(b) 56 days specimen

Fig. 3 XRD analysis for warm water immersion:(cont.)

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



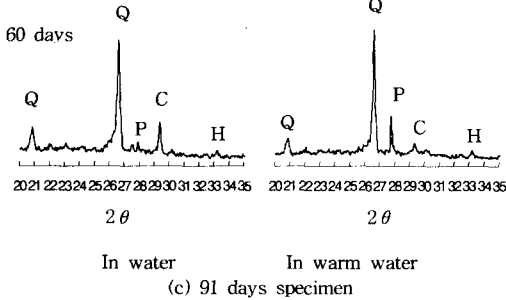


Fig. 3 XRD analysis for warm water immersion:(cont.)
 a) 28 days specimen, b) 56 days specimen, c) 91 days specimen(Q: Quartz, P: Portlandite, C: Calcite, H: Hematite)

3.3 건조-습윤 반복시험

건조-습윤 반복시험은 고유동충전재가 보도 및 도로의 하부기층 등에 사용되어 건조와 습윤이 반복되는 환경에 노출되었을 경우의 재료특성 변화를 알아보기 위해 실시되었다. 대부분의 공극을 포함하는 재료들은 수분의 변화에 따라 체적이 변화되는데, 습윤상태에서는 체적이 팽창하여 표면이 떨어져 나가고 건조상태에서는 수축하여 균열이 발생하게 된다. 타설된 고유동충전재는 계절 변화에 따른 수분의 양이 변화함에 따라 팽창과

수축을 반복하게 된다. 이러한 수분양의 변화에 의해 고유동충전재의 물리적 변화를 초래하여 재료의 열화 및 사용수명을 단축시키는 결과를 나타낸다.

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 비교하였다. 건조-습윤 반복시험은 Fig. 4와 같은 과정으로 이루어졌으며, 실험결과는 Table 7 및 Fig. 5와 같다.

Table 7 및 Fig. 5에서 건조-습윤반복으로 인한 고유동충전재의 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 8 및 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 28일 공시체와 비교하여 재령 91일 공시체의 중량변화가 다소 컸는데, 이는 Fig. 5의 건조-습윤 반복시험의 압축강도 증가수준이 재령

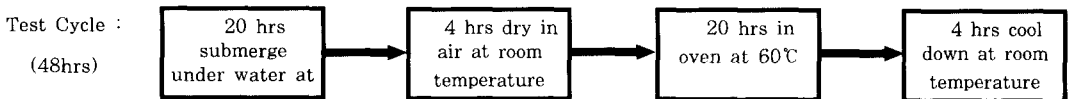


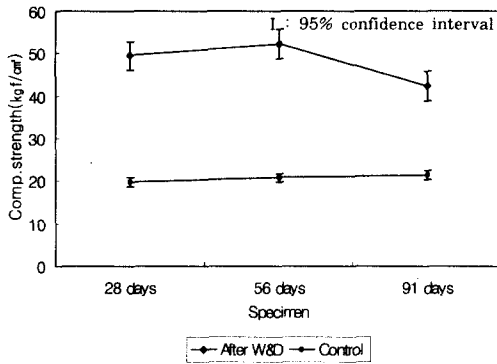
Fig. 4 Repeated wetting and drying

Table 7 Test results of repeated wetting and drying cycles

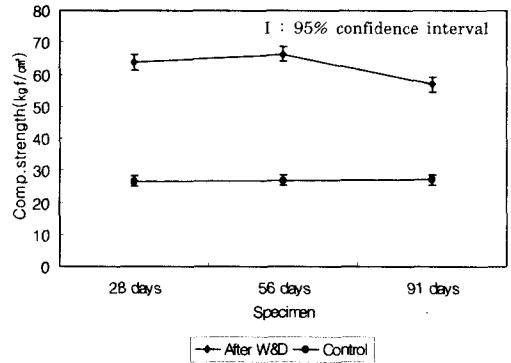
(unit : kgf/cm²)

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

() standard deviation



(a) 8 cycles



(b) 34 cycles

Fig. 5 Comp. strength after repeated wetting and drying; a) 8 cycles, b) 34 cycles

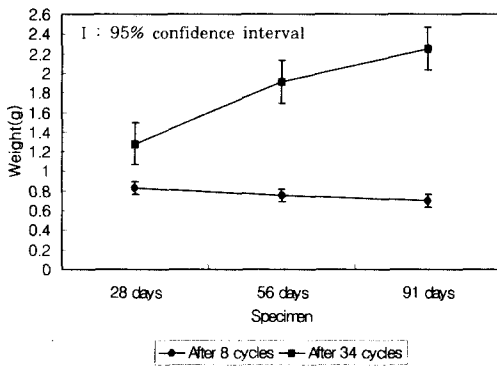


Fig. 6 Weight after repeated wetting and drying

91일 공시체에서 가장 낮은 것과 연관시킬 수 있다. 즉, 공시체 내의 어떤 물질이 생성되어 공시

체의 강도발현을 감소시키면서 중량은 증가시켰음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 7의 X선 회절분석에서 원인을 규명할 수 있는데, 재령 28 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. 시멘트의 수화반응으로 생성되는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)은 플라이 애쉬와 반응하여 불용성의 안정한 규산칼슘수화물 등을 생성하는 포졸란반응을 일으키는 성분으로 장기강도 증진의 결과를 초래한다. 그림에서 재령 91일 공시체는 P성분이 소모됨으로써 Q(Quartz, SiO_2)가 생성되어 중량의 증가수준은 가장 높았지만,

Table 8 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

과도한 생성으로 인한 내부팽창으로 오히려 강도 발현에는 불리하게 작용한 것으로 사료된다.

지속적인 수분공급이 이루어지지 않는 건조-습윤이 반복될 경우 고유동충전재 내부에는 불규칙한 수화반응이 유발되는데, 이러한 경우 고유동충전재의 강도 증가수준은 건조-습윤 환경에 노출되기에 앞서 이미 진행된 수화반응에 좌우된다. 이러한 결과로 인해 Fig. 5와 같이 상대적으로 수화반응이 미미한 재령 28일 공시체 및 수화반응이 거의 종료된 재령 91일 공시체에 비해 진행된 수화반응으로 인한 충분한 P(Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) 성분이 존재하는 재령 56일 공시체의 경우가 지속적인 수분의 공급이 없어도 플라이트워의 포졸란반응으로 강도 증가수준이 가장 높았던 것으로 사료된다.

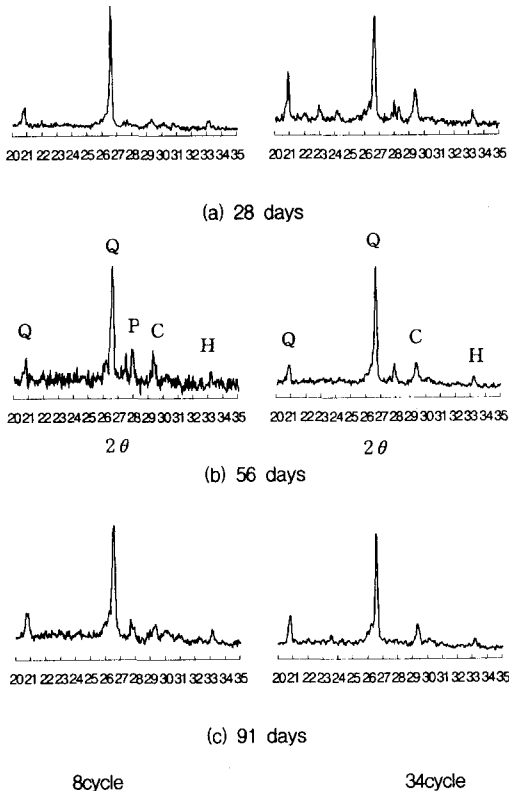


Fig. 7 XRD analysis after repeated wetting and drying; a) 28 days, b) 56 days, c) 91 days

(Q: Quartz, P: Portlandite, C: Calcite, H: Hematite)

3.4 동결융해시험

고유동충전재는 심한 기상작용하에서 특히, 저온 한냉지에 있어서 고유동충전재 내의 수분이 동결함에 의하여 체적이 팽창하고, 미소균열이 발생하여 강도저하는 물론 심할 경우에는 표면에 박리현상이 일어난다. 이와 같은 성능저하는 동결과 융해가 반복되는 것에 의해 촉진되고, 동해는 일반적으로 이 작용을 반복해 주는 동결융해시험에 의해 평가된다. 본 연구의 동결융해시험은 KS F 2456의 B법인 기중동결(-18℃), 수중융해(5℃)법에 따라 실시되었는데, 1사이클의 소요시간은 3~4시간이었다. 공시체는 10×10×40cm의 각주를 사용하였으며 시험개시재령은 14일을 기본으로 하였다. 실험방법은 낮은 동결융해 저항성을 가지는 고유동충전재의 특성을 감안하여 2사이클마다 표준상태 공시체에 대한 상대동탄성계수 및 중량을 측정하였다. 아울러 시험이 끝난 공시체에 대한 X선 회절분석을 실시하여 실험전후의 성분변화도 조사되었다. 동탄성계수의 저하는 동결융해에 의한 공시체 내부 및 균열의 집적으로 나타나는 팽창과 상관성이 있으며, 중량의 변화는 표면의 스케일링(scaling)을 나타낸다.

고유동충전재에 대한 동결융해 실험결과는 Table 9 및 Fig. 8과 같다. 표에서 동탄성계수는 표준상태에서 시간의 경과에 따라 세 번 측정된 값을 평균하였다.

Table 9 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

모든 공시체는 2사이클에서부터 미세한 균열이 발생되었으며, 6사이클에서는 파괴를 일으켜 더 이상 이의 측정이 곤란하였다. 상대동탄성계수의 경우 2사이클에서 약간의 증가를 보였는데, 이는 수화반응의 진행으로 초래된 결과로 보이며 4사이클 이후 감소되어 6사이클에서는 재료의 파괴

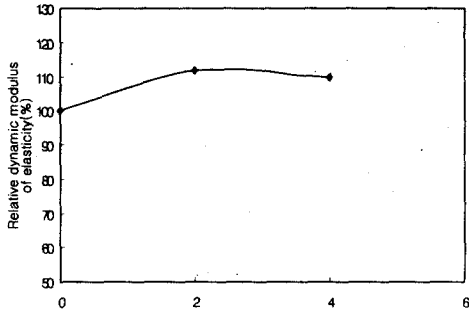


Fig. 8 Relative dynamic modulus of elasticity

로 측정이 불가능하였다. 중량측정의 경우에는 2 사이클부터 심한 박리현상을 나타내었으며, 4사이클부터는 측정이 곤란할 정도로 열화되었다. 이상에서 동결융해에 대한 고유동충전재의 저항성은 재료의 특성상 매우 낮은 것으로 판단되며, 겨울철 시공시 동해를 받지 않도록 특별히 유의하여야 할 것으로 사료된다.

한편, Fig. 9는 동결융해시험을 받은 공시체에 대한 X선 회절분석으로 동해를 입기 전후의 내부 성분변화를 나타낸 것이다. 동결융해시험의 경우, 공시체의 파괴는 내부수분의 동결로 인한 팽창으로 발생되지만 Fig. 9에서 보듯 고유동충전재 내부에서는 수화반응으로 인한 P(Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) 성분이 생성되었음을 알 수 있다. 이는 2 및 4사이클에서 동탄성계수가 증가된 측정결과와 일치한다.

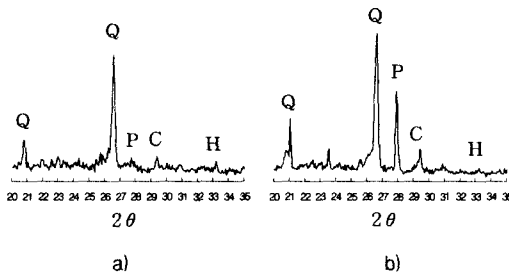


Fig. 9 XRD analysis after freezing and thawing; a) 0 cycle, b) 6 cycle

(Q: Quartz, P: Portlandite, C: Calcite, H: Hematite)

일반적으로 입상충전재들의 동해발생 가능성과 그 정도는 물에 대한 여러 가지 성질 중에서도

토질의 투수성에 관계가 가장 크다. 특히, 기존에 충전재로 주로 이용되었던 실트질 모래에서는 흙착수막 내의 물분자의 이동이 비교적 용이하여 모관상승고가 비교적 크고 투수성도 커서 주위로부터의 수분의 공급이 용이하여 두터운 얼음층이 발달된다. 그러나 고유동충전재는 투수성이 낮아 주위로부터의 수분의 공급이 용이치 않으므로 입상충전재와 같이 동상현상이 크지 않다. 아울러 동해를 입은 지반이 융해되면, 연약하게 되고 지지력을 잃게되는 연화현상을 일으키는데 반해, 무수축 재료인 고유동충전재는 균일한 밀도를 유지할 수 있다. 이상에서, 고유동충전재는 화학적인 침식이나 동결융해에 저항하도록 설계되지는 않지만 기존의 입상충전재에 비해 높은 내구성을 지니며, 동결융해 저항성 면에서도 낮은 투수성 및 무수축 특성으로 인해 좋은 효과를 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 산업부산물인 플라이 애쉬를 다량으로 사용하여 저장도의 비구조적인 부재에 적용이 가능한 고유동충전재의 내구특성을 실험적으로 구명한 것으로 얻어진 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 고유동충전재의 내구특성 실험결과 투수성은 토질에서의 불투수성에 해당되었으며, 일반적인 고유동충전재의 투수계수($5 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$) 보다 낮은 10^{-9}cm/sec 로 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 증가 수준은 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.

참고문헌

1. 정재동, 콘크리트재료공학, 보성각, 1998., pp. 305~336.
2. 문한영, 서정우, 콘크리트 혼화재료, 한국콘크리트학회 편, 1997., pp. 186~216.
3. 김영근, 박유신, "플라이애쉬의 전자재 활용화 방안", 전자재 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.
6. Patrick J. Stephens, "Low pressure grouting of polyethylene pipe", Concrete International, October 1989., pp. 45~46.
7. Ronald L. Larsen, "Sound uses of CLSMs in the environment", Concrete International, July 1990., pp. 26~29.
8. R. Junardhanam, F. Burns and R.D. Peindl, "Mix design for flowable fly-ash backfill material", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.4, No.3, August 1992., pp. 252~263.
9. Report by ACI Committee 229, "Controlled low strength materials, Concrete International", July 1994., pp. 55~64.
10. T.R. Naik and B.W. Ramme, "Low strength concrete and controlled low-strength material (CLSM) produced with Class F Fly ash", SP 150-1, American Concrete Institute, Detroit, 1994., pp. 1~13.
11. Tarun R. Naik, Bruce W. Ramme, and Henry J. Kolbeck, "Filling abandoned underground facilities with CLSM fly ash slurry", Concrete International, July 1990., pp. 19~25.
12. T.E. Nantung and C.F. Scholer, "Freezing and thawing durability and early set and strength development of CLSM", SP 150-4, American Concrete Institute, Detroit, 1994., pp. 53~86.
13. W.E. Brewer, "Durability factors affecting CLSM", SP 150-3, American Concrete Institute, Detroit, 1994., pp. 39~51.
14. Wayne S. Adaska, "Controlled low-strength materials", Concrete International, July 1997., pp.41~43.

요 약

본 연구의 목적은 다량의 플라이 애쉬를 사용한 고유동충전재의 내구특성을 평가하는 것이다. 고유동충전재는 자체의 뛰어난 물리적 특성으로 인해 타설시의 고유동성 및 타설 이후의 굴착성을 확보할 수 있어 다짐이나 접근이 어려운 시공지역이나 장래에 굴착이 예상되는 지역에 이용이 가능한 재료이다. 연구에 사용된 플라이 애쉬는 KS 및 ASTM 기준을 만족하였으며, 고유동충전재의 압축강도 10~15kgf/cm², 슬럼프 25±1cm를 만족하는 최적배합설계는 시멘트: 60kgf/m³, 플라이 애쉬: 280kgf/m³, 모래: 1400kgf/m³, 물: 319kgf/m³였다. 재료거동 및 경제성을 고려한 최적배합에 대한 투수성시험, 더운물침지시험, 건조-습윤 반복시험, 동결융해시험 등 여러 가지 내구특성 실험이 실시되었는데, 만족할만한 성능을 나타내었다.

(접수일자 : 1999. 12. 1.)