유리 연마슬러지를 혼입한 콘크리트의 복합열화 저항성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Multi-Deterioration Resistances of Concrete containing Waste-glass Sludge

이현기* · 오홍섭** · 심종성*** · 지광습****

Lee, Hyeonggi · Oh, Hongseob · Sim, Jongsung · Zi, Gwangseop

Abstract

Subsidiary concrete structures such as a barrier and a side-channel suffer from rapid deterioration due to the excessive use of an de-icing in Korea. Consequently, the needs for replacement and/or repair of the structures has increased significantly, resulting in the increase of the maintenance cost. The preliminary study strongly indicates that it is necessary to improve the durability and visibility of the subsidiary structures in order to reduce the maintenance cost of the structures. Hence, the purpose of this research project is to develop a concrete with high durability by incorporating waste-glass or polymer admixture in concrete. And in order to develop concrete of high durability by utilizing waste glass, a research was focused on an effect of waste glass sludge mixing over concrete strength and durability and measurement for compression strength by each material age performed together with chloride ion penetration resistance and scaling resistance test for properties of multi-deterioration.

Key words : Chloride ion penetration test, Multi-deterioration, Waste glass sludge, Scaling resistance test

요 지

국내 콘크리트 방호벽, 측구와 같은 소구조물들은 과도한 제설제의 사용에 의해 복합열화의 피해를 받고 있으며, 구조물의 유지보수비 절감과 안전성 향상을 위해 콘크리트 소구조물의 내구성 증진이 요구되는 상황이다. 따라서 본 연구의 목적은 폐유리를 활용한 고내구성 콘크리트 개발하는 것이다. 이에 따라 폐유리를 활용한 고내구성 콘크리트 개발을 위해 폐유리 혼입에 따른 콘크리트 강도 및 내구성의 영향에 초점을 맞추었으며, 먼저, 재령별 압축강도 시험을 수행하였으며, 복합열화 특성을 확인하기 위하여 염화물 확산계수 시험과 박리저항성 시험을 실시하였다.

핵심용어 : 복합열화, 박리저항성시험, 염화물 침투 실험, 폐유리 슬러지

1. 서 론

고속도로 상에서 제설제 살포량이 많고 살포 빈도가 높은 지역은 해발이 높는데 위치하고 있고, 동절기 강설일수가 많고 적설량 또한 많을 뿐만 아니라 동결일수가 1년 중 100일 이상인 적설한랭지에 위치하고 있다. 이와 같이 적설한랭지를 통과하는 고속도로에서는 원활한 주행조건을 확보하기 위하여 제설제인 염화나트륨(Sodium chloride, NaCl)과 염화칼슘(Calcium chloride, CaCl₂)을 빈번하게 살포하고 있다. 여기

에 포함되어 있는 염화물은 염해 및 동결융해에 의한 동해가 복합적으로 작용함으로써 콘크리트에 발생하는 복합열화의 원인으로 작용하게 된다. 이에 따라 국내 고속도로 상의 콘크리트 방호벽, 측구와 같은 소구조물들은 과도한 제설제의 사용에 의해 복합열화 피해를 받고 있으며, 피해 구조물의 유지 및 보수를 위하여 점차 많은 유지보수 비용이 요구되고 있다. 따라서 구조물의 유지보수비용 절감과 도로의 안정성 향상을 위하여 콘크리트 소구조물의 내구성 증진이 점차 요구되는 있는 상황이다.

*정회원. 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정(E-mail: lhk0228@hanyang.ac.kr)

Member. Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Hanyang University

**교신저자. 정회원. 경남과학기술대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-55-751-3299, Fax: +82-55-751-3209, E-mail: opera69@chol.com)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

***한양대학교 건설환경공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Hanyang University

****고려대학교 건설환경시스템공학부 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Korea University

산업부산물 중 폐유리의 경우, 유리제품 활용이 증가됨에 따라 발생량이 증가하고 있으나 폐유리병을 제외하고는 재활용이 현실적으로 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 현재 대다수의 폐유리는 매립 등의 방법으로 처리되고 있으나, 환경문제를 야기할 수 있어 이를 재활용하기 위한 다양한 연구가 다양하게 진행되고 있다.(Krishnan, 1996, Bae et al., 2000; Park et al., 2001; Kang et al., 2008) 유리 또는 광학장비의 표면 연마시 발생하는 유리 슬러지는 입형이 구형이고 화학성분의 70%정도의 실리카(SiO_2) 성분으로 최근 연구에서 시멘트와의 수화반응시 포졸란 반응성이 확인되어 굳은 콘크리트의 물리적 특성을 향상시키고 굳지 않은 콘크리트의 레올로지 특성을 개선하며 블리딩의 저감, 수화열 억제 등에 효과적인 것으로 보고되고 있다(Park et al., 2002; Kang et al., 2008).

또한, 포졸란 반응에 의해 내부 조직이 치밀해져 투수성이 낮아지므로 염화물과 같은 유해물질이 외부로부터 침입하는 것이 억제하고, 시멘트에 치환하여 사용함으로써 알루미늄산 3석회(C_3A)의 양을 줄일 수 있다. 더욱이 유리 연마슬러지는 CaO 와 SiO_2 성분이 포함되어 있어 물과 일부 반응하여 규산 2석회($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) 또는 규산 3석회($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)가 생성 및 유리 연마슬러지 미분말에 의한 공극충진 효과로 내구성능을 증진시키는데 효과적일 것으로 판단된다(Kang et al., 2008; Lee et al., 2012). 그 밖에도 자원고갈과 시멘트 제조 시 발생하는 CO_2 에 의한 환경문제가 대두되고 있는 실정에서 경제적이고 친환경적인 폐기물 재활용의 일환으로 콘크리트 대체재 및 혼화제로서의 활용가치가 높다고 사료된다(Ahmad, 2002).

따라서 본 연구는 유리 연마슬러지를 혼입한 콘크리트를 고속도로상의 콘크리트 방호벽, 측구와 같은 소구조물에 적용하기 위하여 유리 연마슬러지 및 플라이애시의 혼입율에 따른 복합열화 특성을 동결융해 손상을 받은 콘크리트의 염화물 확산계수 및 스케일링 저항성 실험을 통해 평가하고, 기존 플라이애쉬만을 혼입한 콘크리트와 비교·분석함으로써 유리 연마슬러지 혼입 콘크리트의 복합열화 저항성에 대하여 평가하고자 하였다.

2. 복합열화 메커니즘

2.1 복합열화에 의한 콘크리트 손상 메커니즘

콘크리트 구조물은 여러 열화작용에 의해 구조물의 성능이 복합적인 손상을 받게 되며, 이를 복합열화라 정의할 수 있다. 여기서는 복합열화에 의한 콘크리트 손상 메커니즘에 대하여 정리하였다.

콘크리트 구조물은 열화요인이 존재하더라도 표면에 있는 마감재 등에 의해 열화가 바로 발생하지 않으며, 이 기간 동안 콘크리트는 어떠한 변화가 생기지 않는다고 보며, 건전한 상태로 간주한다. 복합열화의 경우 열화증상의 발견패턴은 여러 열화증상이 동시에 발견되는 경우가 있고, 여러 열화요인의 작용에 의해 하나의 열화증상으로 발견되는 경우가 있다.

여러 열화작용 하에서 콘크리트 열화 진전은 열화요인이

존재하더라도 열화가 발생하지 않는 건전기, 열화가 진행되어도 열화증상은 발견되지 않는 잠복기, 열화증상은 발견되었지만 열화속도는 억제 받고 있는 진전기, 열화속도가 급격히 증가되는 가속기, 구조물의 안전성, 사용성 등 성능에 영향이 미치는 열화기의 5단계로 분류된다.

복합열화는 복수의 열화작용이 복합하여 생긴 열화라고 간단히 정의할 수 있으나, 실제적으로 복합열화의 발생방식은 다양한 패턴이 있다. 즉, 열화요인의 발생시기로 볼 때, 동시에 복수의 열화작용이 생긴 경우와 하나의 열화작용이 선행하고 일정한 시간이 경과한 후 다른 열화작용이 병행하는 경우가 있다. 또한, 열화증상의 복합시기에 있어서도, 동시에 복수의 열화증상이 나타나는 경우와 일정한 시간차를 두고 다른 열화증상이 나타나는 경우로 구분할 수 있다. 더구나, 열화증상의 진행속도 측면에서도 단독열화의 경우와 같은 열화속도로 진행되는 복합열화가 있고, 단독열화보다 빠른 열화속도로 진행되는 복합열화도 있다.

이들을 종합해서 볼 때 복합열화는 단독적 복합열화, 상승적 복합열화 그리고 인과적 복합열화로 크게 분류할 수 있다. 단독적 복합열화는 열화작용은 동시에 작용하지만, 열화작용간의 상승효과는 발생하지 않고, 열화증상의 진행속도도 단독열화의 경우와 같은 정도로 진행되는 복합열화를 말한다. 상승적 복합열화는 열화요인의 상승효과 뿐 아니라 열화과정에서도 상승효과가 있어 열화증상의 진행속도가 단독열화 경우보다 가속되는 복합열화를 의미한다. 한편, 인과적 복합열화는 하나의 열화과정에 의한 현상이 다른 열화작용을 초래하는 경우와 하나의 열화증상이 나타난 결과 다른 열화작용을 촉진시키는 경우 등이 있다.

2.2 콘크리트 소구조물의 복합열화

겨울철 콘크리트 소구조물에 발생하는 적설 및 결빙에 의한 손상은 구조물 유지관리 차원에서 중요한 과제가 되고 있

(a) Deterioration of concrete barriers

(b) Deterioration of concrete gutters

Fig. 1. Photograph of concrete scaling

다. 이 중, 화학적 방법의 제설 대책으로서는 주로 염화나트륨이나 염화칼슘 등이 동결방지와 융빙이라는 목적으로 사용되고 있으며, 해를 거듭할수록 그 사용량이 증가하고 있다. 제설대책을 위해 이들 염화물을 살포하게 되면 Fig. 1과 같이 콘크리트가 계속적으로 반복되는 동결융해의 피해를 입어 통상적인 동해열화와는 달리 콘크리트 표면이 기형으로 박리되는 스케링(scaling)이 발생한다는 것이 특징이라고 알려져 있다. 또한 염화물의 영향은 강재의 부식 등에 의한 콘크리트 구조물의 조기 열화(deterioration)에 의한 손상을 발생시키기도 한다.

3. 연구내용 및 방법

3.1 사용재료

3.1.1 유리 연마슬러지

본 연구에서 사용될 유리 연마슬러지는 국내 유리 가공업체 중 발생하는 폐유리 슬러지를 샘플링하여 유리 연마슬러지의 성분, 입도 및 입형을 분석하여 선정하였다. 또한 콘크리트에 혼입하기 위하여 건조 및 분쇄 공정 이 후 사용하였다. 실험에 사용될 유리 연마슬러지의 물리적, 화학적 성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition and physical properties of waste glass sludge

Physical properties		Chemical composition	
Classification		Classification	% (by mass)
Average size(μm)	14.65	SiO ₂	68.1
Specific Surface Area (cm ² /cm ³ ; Volume)	7861.46	Al ₂ O ₃	10.1
		Fe ₂ O ₃	0.24
Uniformity	0.81	CaO	9.9
		MgO	2.94
Specific gravity	2.632	Na ₂ O	7.62
		K ₂ O	0.23
pH	10.58	SO ₃	0.37
		LOI	0.77

3.1.2 시멘트

본 연구에서 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 사용된 시멘트에 대한 화학성분 분석 결과는 다음 Table 2와 같다.

3.1.3 플라이애쉬

본 연구에서는 실리카(SiO₂), 알루미나(Al₂O₃), 산화철(Fe₂O₃)의 성분비가 70% 이상인 Class F 플라이애시를 사용하였으며, 화학적 성분 및 물리적 성질은 Table 3과 같다.

3.1.4 골재

굵은 골재는 최대치수 25 mm인 쇄석을 불순물이 함유되지 않도록 세척한 후 표면건조 포화상태로 조정하여 사용하였으며, 잔골재는 염분이나 불순물이 함유되지 않은 세척사를 사용하였다. 배합시 사용된 굵은 골재 및 잔골재의 물리적 특성은 다음 Table 4에 나타내었다.

3.1.5 혼화제

국내에 소개되어 있는 감수제(혼화제)는 일반적으로 리그닌(Ligninsulfonate)계, 나프탈렌(Naphthalene sulfonate)계 그리고 최근에 많이 소개되고 있는 폴리카복산(Polycarboxylate)계로 크게 나누어지고 있다.

본 연구에서 콘크리트 배합설계가 물-시멘트비가 40~45%로 설계되고, 콘크리트 분산 능력에 의한 작업성(Workability) 및 강도발현 등에 적합한 폴리카복산계(PC계)로 선정하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 콘크리트 배합

유리 연마슬러지 및 플라이 애시의 혼입율에 따른 복합열화에 대한 특성의 변화를 파악하기 위해 시험배합을 통하여 Table 5와 같이 배합설계를 하였다.

또한 기계타설 소구조물의 시공에 적합하도록 목표슬럼프는 2~5 cm, 목표공기량은 5~7%로 설정하였다. 기계타설로 시공되는 소구조물의 경우 공기량은 동결융해 저항성을 갖기

Table 2. Chemical composition of cement

Item Type	Chemical composition (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
OPC	20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	0.12	0.93	2.1

Table 3. Chemical composition and physical properties of fly ash

Item Type	Chemical composition (%)					Specific gravity	Specific surface (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
Class F	66.1	23.3	4.2	1.2	0.8	2.19	3.735

Table 4. Physical properties of aggregate

Item Type	Gmax	Specific gravity	Absorption (%)	Percentage of abrasion (%)	Solid volume (%)
Coarse Aggregate	25	1.13	2.67	24.1	60.8
Fine Aggregate	-	1.53	2.62	-	63.7

Table 5. Mix proportion of concrete

Type \ Items	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	WGS (%wt)	FA (%wt)	Unit weight (kg/m ³)					
								Water	Cement	Waste glass sludge	Fly Ash	Fine Aggregate	Coarse Aggregate
45W0F20(Mix 1)	25	2~5	6±1	45	48	0	20	151	268.4	0.0	67.1	840.2	927.8
45W10F10(Mix 2)				45		10	10		268.4	33.6	33.6	843.4	931.2
40W10F10(Mix 3)				40		10	10		302.0	37.8	37.8	825.7	911.7
45W5F0(Mix 4)				45		5	0		318.8	16.8	0.0	850.4	939.0
45W10F0(Mix 5)				45		10	0		302.0	33.6	0.0	849.1	937.5

위해 6±1%의 공기량을 갖도록 하는 것이 일반적이다.

3.2.2 압축강도 시험

압축강도 측정을 위해 KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 의하여 $\phi 100 \times 200$ mm의 실린더형 공시체를 재령 7, 14, 28, 56, 90일에 유리 연마슬리지 및 플라이애시의 혼입율에 따라 각 5가지 변수별로 제작하여 압축강도를 측정하였다. 공시체는 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 양생하고 탈형 후 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 항온 조건에서 수중양생을 실시하였다.

3.2.3 염화물 확산계수 시험

염소이온 투과 저항성 시험은 염화물 확산 계수 산정을 위해 NT Build 492 “CONCRETE, MORTAR AND CEMENT-BASED REPAIR MATERIALS : CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY - STATE MIGRATION EXPERIMENTS”의 방법에 준하여 수행하였다. 염화물 확산계수 시험체는 재령 14일 양생한 시편을 대상으로 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체의 중앙을 기준을 양쪽부분을 50 mm 두께로 절단하여 하나의 공시체 당 2개의 시편을 제작하여 시험을 실시하였다. 또한 동결융해 및 복합염화 환경에서의 표면에서의 침투만을 고려하고, 원 넓이의 손실이 없도록 하기 위해 시험체의 둘레를 예폭시 코팅 처리하였다.

또한 동결융해에 의한 염화물 확산계수를 산정하기 위해, KS F 2456에 준하여 수중 동결융해(A법) 300 사이클(cycles)을 수행하였으며, 동결융해 시험에 의한 시편의 경우 복합염화에 대한 영향을 확인하기 위하여 담수와 염수($\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$ (7:3) 4%)로 나누어 각각의 시편 처리를 하였다. 그리고 0, 60, 120, 180, 240, 300 사이클(cycles)에 해당하는 시편은 시험 전 진공처리 및 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액에 침지하였으며, 제설용액에 노출된 시편을 고려하여 48시간 동안 전처리 과정을 수행하였다. 염화물 확산 시험 후, 염화물 확산 계수 산정은 0.3N의 NaOH 수용액(약 물 1 l에 NaOH 12 g)을 (+)극으로, 10% NaCl 수용액(NaCl 100 g + 증류수 900 g)을 (-)극으로 하여 30V의 전압을 가하였을 때의 전류 값에 기초하여 적용 전압수준 및 시험지속시간을 선정해 실시하였다.

염화물이온 침투깊이는 Fig. 2, 3과 같이 시험이 종료한 후 시험편을 할렬하여 0.1N AgNO_3 를 분무하였을 때 변색되

Fig. 2. Illustration of the measurement of the chloride penetration depths

Fig. 3. Photograph of chloride penetration depths

는 부분을 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였으며, 시험조건과 측정된 깊이를 바탕으로 NT Build 492의 확산계수 식 (1)을 이용하여 각 변수에 대한 염화물 확산 계수를 산출하였다.

$$D = \left(\frac{RT}{zFE} \cdot \frac{s_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \right) \quad (1)$$

기호

$$E = \frac{U-2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

D = 염화물 확산계수 (m^2/sec)

z = 이온의 원자 값 (염소이온의 경우 $z = 1$)

F = 패러데이 상수 ($F = 9.648 \times 10^4 \text{ J/V} \cdot \text{mol}$)

U = 적용한 볼트의 절대 값 (V)

R = 기체상수 ($R = 8.314 \text{ J/V} \cdot \text{mol}$)

T = 처음과 끝의 (+)극 용액의 평균온도 (K)

L = 시편의 두께 (m)

x_d = 염소이온의 침투깊이 (m)

t = 실험 지속시간 (sec)

erf = error function

c_d = 질산염에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도 ($c_d = 0.07N$)

c_0 = (-)극 셀의 염소이온 농도 ($c_0 = 2N$)

위의 식을 이용하여 동결융해 사이클에 따른 염화물 확산 계수를 산정하였으며, 0 사이클(cycle)의 경우 동결융해 및 제설용액에 노출되지 않은 조건에서 측정하였다.

3.2.4 스케일링 시험

박리저항성 시험은 염화물 종류 및 동결융해 사이클(cycle)에 따라 콘크리트 표면 박리저항성에 미치는 영향을 파악하기 위해 ASTM C 672에 의거하여 수행하였다(Yun 등, 1999). 시편은 30×30×10 cm 크기의 직육면체 공시체를 제작하여 14일간 수중양생 후에 콘크리트 시편에 폭 및 두께가 1×1 cm인 다이크를 설치한 후 실리콘으로 다이크와 시편을 1차 코팅 및 고정하고 그 위에 모르타르를 덮고 모르타르 내 벽에 2차 실리콘 코팅을 실시하였다. 다음 Fig. 4는 실제 제작된 시험체 사진을 나타내었다.

복합열화에 대한 영향을 알아보기 위해 시험용액은 현재 현장에서 사용되고 있는 제설염 농도에 따라 담수와 염수(NaCl+CaCl₂(7:3), 4%)로 시편 처리하였으며 ASTM C 672 시험 기준에 의거하여 동결융해 사이클(cycle)은 8시간 동안 항온항습실을 이용하여 23±2.0°C, 상대습도 45~55%를 유지하여 용해하며, 16시간동안 -18±3°C 온도로 동결시키는 과정을 1 사이클(cycle) 기준으로 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 사이클(cycles)에서의 표면박리(mass of scaled off particles) 저항성을 매 5 사이클(cycles)마다 시험체의 중량감소를 및 스케일링으로 측정하였다. 5 사이클(cycles)마다 용액을 교환하였으며 시험체의 중량측정 및 스케일링을 측정하기 이전에 시편의 흡수된 용액의 증발을 위하여 24시간 건조 후 중량 및 스케일링 육안 측정을 하였다.

ASTM C 672에서 제시하고 있는 시험기준 다음 Table 6

Fig. 4. Photograph of test specimen production by ASTM C 672

Table 6. ASTM C 672 standards

Classification	Test Standards		
Freezing and thawing test	Freezing	-18±3°C	16~18hours
	Thawing	23±2°C	6~8hours
Relative humidity	45~55%		
Ratio of weight loss	Measure each 5cycle		

유리 연마슬러지를 혼입한 콘크리트의 복합열화 저항성에 관한 실험적 연구

Table 7. ASTM C 672 standards for scaling

Rating	Condition of Surface
0	No Scaling
1	Very slight scaling(max. 3.2mm depth), no coarse aggregate visible
2	Slight to moderate scaling
3	Moderate scaling (some coarse aggregate visible)
4	Moderate to severe scaling
5	severe scaling (coarse aggregate visible over entire surface)

과 같이 정리하였으며, 동결융해가 진행됨에 따라 25 사이클(cycles)에 대한 스케일링 정도를 다음 Table 7과 같이 0~5 등급으로 규정하고 있다.

본 연구에서는 각각의 변수 비교를 보다 정량적인 수준의 결과를 확인하기 위해 중량감소량과 감소율을 산출하여 각 시험체의 복합열화에 따른 스케일링 정도를 비교·분석하였다.

4. 연구결과

4.1 압축강도 시험 결과

유리 연마슬러지 및 플라이애시를 적용한 콘크리트의 혼입율에 따른 압축강도 시험결과를 다음 Fig. 5에 나타내었고, 재령 28일에서 모든 배합은 설계강도 24MPa를 만족하였다. 재령 90일의 압축강도는 40W10F10 > 45W5F0 > 45W10F10 > 45W10F0 > 45W0F20 순으로 나타났으며, 플라이애시만 20%혼입한 콘크리트와 비교하여 각각 23.8, 20.8, 7.0, 6.0% 강도 증진을 보였다. 이는 미립분인 유리 연마슬러지가 골재와 골재 사이의 공극을 밀실하게 채워주고 미세한 입자에 의한 필러효과 때문으로 판단된다. 그리고 유리 연마슬러지의 경우 플라이애시와 혼합사용하여도 콘크리트 강도발현에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

동일한 물시멘트비에서는 유리 연마슬러지 5% 혼입한 경우 가장 우수한 강도 발현을 보여 유리 연마슬러지의 우수한 포졸란 반응성을 확인하였다. 반면 유리 연마슬러지 10% 혼입한 경우 강도가 저하되는 양상을 보이는데 이는 유리 연마슬러지가 Ca, Si 및 Al 성분이 다량 포함되어 있지만 화학

Fig. 5. Compressive strength test results

구조가 안정화되어 소량만 반응하였기 때문에 분석된다. 유리 연마슬러지를 다량으로 혼입한 콘크리트의 경우 표면은 경화되어 있으나, 내부는 겔(gel)상태로 남아 강도 저하에 영향을 미친다는 연구결과가 보고되고 있다.

4.2 염화물 확산계수 시험결과

염소이온 투과저항성을 확인하기 위하여 염화물 확산계수 시험인 NT Build 492에 준하여 시험을 실시하였으며, 각 변수에 대해 염소이온 침투 깊이를 측정 후 규준에 따라 염화물 확산계수를 산출하였다. 그 결과를 다음 Figs. 6, 7에 나타내었다.

시험 조건은 위에 설명한 바와 같이 담수 및 염수(NaCl+CaCl₂(7:3), 4%)로 처리하여 모든 시험체의 시편 처리를 KS F 2456에 준하여 수중 동결융해(A법) 300 사이클(cycles)을 수행하였으며, 매 60cycle마다 염화물 침투 깊이를 측정하였다. 따라서 0cycle의 경우 무처리 시험체에 대한 염화물 확산계수이다.

염화물 확산계수 시험결과 모든 시험체가 동결융해 사이클이 반복됨에 따라 증가하는 경향을 보이다가 120cycle이 후 수렴되는 경향을 나타내었으며, 염수조건의 경우 약 10~40% 이상의 염화물 확산계수가 측정되었다. 염화물 확산계수는 45W0F20 > 45W5F0 > 45W10F10 > 45W10F0 > 40W10F10 순서로 나타났다. 확산계수는 그 값이 낮아짐에 따라 저항성이 우수하다는 것을 나타낸다. 따라서 염화물 확산계수의 경우 역학적 특성과는 달리 플라이애시를 혼입한 경우 염소이온 침투 저항성 증진에 효과적인 결과를 나타내었다. 이는 플라이애시를 시멘트의 대체 재료로 사용함으로써 콘크리트

Fig. 6. Chloride penetration coefficient test results(NaCl+CaCl₂, 0%)

Fig. 7. Non-steady-state migration coefficient test results (NaCl+CaCl₂, 4%)

내의 알칼리 농도 희석 및 Ca(OH)₂의 감소 때문인 것으로 사료된다.

또한 유리 연마슬러지 및 낮은 물-결합재 비를 통하여 염화물 침투 저항성이 개선됨을 확인하였으며, 이는 유리연마슬러지 혼입에 의한 포졸란 반응 및 낮은 물-결합재 비로 인해 공극이 감소하고 이에 따라 수밀성이 증대된 것으로 판단된다.

4.3 스케일링 시험결과

본 연구에서는 ASTM C672에 준하여 시험을 실시하였으며, 동결융해 cycle이 진행됨에 따른 표면의 박리 정도와 정량적인 분석을 위하여 각 변수의 콘크리트 시편에 대한 중량 감소율을 산출하였다.

스케일링 시험결과 동결융해 cycle이 진행됨에 따라 25cycle까지 모든 변수가 표면에서 굵은 골재 노출이 확인되지 않았으며, 스케일링 또한 3.2 mm 깊이 이하를 나타내어 표면 박리 저항성이 우수한 1~2등급을 나타내었다. 염수조건의 경우 스케일링양이 급격히 증가함에 따라 45W0F20 시험체의 방수를 위해 제작된 실리콘이 탈락되거나 실리콘과 콘크리트 표면사이의 균열이 발생하는 현상으로 인해 제설용액이 담수되지 않아 35cycle 후 45W0F20 시험체에 대한 실험을 중단하였다. 중량 감소량 및 감소율을 Figs. 8~11에 나타내었다.

표면 관찰 결과, 담수 및 염수조건에서 스케일링 시험체는 플라이애시만 혼입한 45W0F20의 경우, 유리 연마슬러지가 혼입된 배합에 비해 표면 손상이 심하게 발생하였다. 반면 유리 연마슬러지를 혼입한 콘크리트의 경우 표면의 상태가 양호한 것으로 나타났다. 이는 유리 연마슬러지의 혼입으로

Fig. 8. Losses of weight(NaCl+CaCl₂, 0%)

Fig. 9. Losses of weight(NaCl+CaCl₂, 4%)

Fig. 10. Ratio of lost weight(NaCl+CaCl₂, 0%)

Fig. 11. Ratio of lost weight(NaCl+CaCl₂, 4%)

인한 표면 경화 및 필러효과가 기인한 것으로 판단된다.

시험결과, 중량감소율은 담수 및 염수처리 시편 모두 45WS5F0 > 40WS10F10 > 45WS10F0 > 45WS10F10 > 45WS0F20의 순서로 표면 박리 저항성이 우수한 것으로 확인하였다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 유리 연마슬러지 혼입에 따른 포졸란 반응성 및 미립분으로 기타 충전제의 역할을 하기 때문으로 사료된다. 이에 따라 폐유리 슬러지 혼입에 의한 박리 저항성 개선을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 유리 연마슬러지를 이용한 고내구성 콘크리트 개발을 하여 도로용 콘크리트 소구조물용 고내구성 콘크리트 적용을 위한 연구를 수행하였다.

고속도로용 소구조물에 적용하기 위해서 제설제 및 동결융해에 따른 복합열화 특성을 고찰하고자 동결융해 반복에 따른 염화물 확산계수 시험과 스케일링 시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 사용된 유리 연마슬러지는 평균 입도 14.65 μm 이며, 주 성분은 실리카(SiO_2) 68.0%, 알루미나(Al_2O_3) 10.1%, 산화나트륨 (Na_2O) 7.6%로 구성되어 있는 비정질 재료로써 콘크리트 혼입에 적합하였다고 판단된다. 또한 미립분의 유리 연마슬러지를 사용함으로써 유리 성분 중 실리카 성분에 의한 알칼리-골재 반응의 억제에 기여하였다고 사료된다.
- 2) 압축강도 시험결과, 폐유리 슬러지를 혼입한 45WS10F10, 40WS10F10, 45WS5F0, 45WS10F0의 경우, 45WS0F20 보다 5~23% 우수한 강도증진 효과를 보였으며, 이는 유

리성분 중 대부분이 실리카(SiO_2)으로, 시멘트와의 반응 시 포졸란과의 반응 및 미립분으로 기타 충전제 역할을 하였기 때문이라고 판단된다.

- 3) 또한 유리 연마슬러지의 혼입량이 10%로 증가할 경우 강도가 저하되는 양상을 나타내었으며, 이는 유리 연마슬러지가 Ca, Si 및 Al 성분이 다량 포함되어 있지만 화학구조가 안정화되어 소량만 반응하였기 때문으로 분석된다.
- 4) 복합열화에 대한 저항성을 확인하기 위해 동결융해 KS 2456(A법)의 반복 및 손상을 받은 시험체에 대한 염화물 확산계수 시험을 수행하였다. 동결융해 사이클이 반복됨에 따라 염화물 확산계수도 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 반복적인 동결융해에 따른 공극구조의 변화와 관련이 있는 것으로 사료되며, 유리 연마슬러지를 혼입한 콘크리트의 경우 우수한 염화물 침투 저항성을 보였다. 유리 연마슬러지를 혼입함으로써 유리슬러지의 포졸란 반응성 및 유리 미분말에 의한 공극충진효과로 수밀성이 증진된 것으로 판단된다.
- 5) 박리저항성의 경우, ASTM C 672에 명시된 육안등급 외에 질량감소량 및 감소율을 통해 콘크리트 표면의 열화정도를 확인 할 수 있었으며, 유리 연마슬러지를 혼입한 45WS10F10, 40WS10F10, 45WS5F0, 45WS10F0의 배합의 성능이 우수한 것으로 나타났다. 유리 연마슬러지의 혼입으로 인한 표면 경화 및 필러효과가 기인한 것으로 사료된다.
- 6) 이와 같은 결과를 바탕으로 콘크리트의 내구성 시험 수행시 적용하기 위한 현장에 따른 여러 복합열화에 대한 검토가 필요할 것으로 판단되며, 이 연구를 통하여 복합열화 특성을 위한 내구성 시험을 위한 기초자료로서 활용이 가능할 것이라고 판단된다.

감사의글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원(20120093)과 경남과학기술대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 저자들은 이에 감사드립니다.

References

- Ahmad Shayan (2002) Value-added Utilisation of Waste Glass in Concrete, *IABSE SYMPOSIUM MELBOURNE*, Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp.58-66.
- Bae, S.-H., Chung, Y.-S. (2000) Experimental Study on the Mechanical Properties of Glass Concrete with Powdered Waste Glasses, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 1, pp. 54-61.
- Kang, H.J., Koh, K.T., Ryu, G.S., Lee, J.H., Park, J.J. (2008) The Strength Characteristics of Cement ZERO Mortar Mixing Waste Glass Powder and Fly Ash as Binder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute conference-Fall*, 649-652.
- Krishnan Viswanathan, B.E. (1996) Characterization of Waste Recycled Glass as a Highway Material, *Dessertation of MS in civil engineering*, Texas Tech University, p. 91.
- Lee B.D. and Yun, B.S. (2005) Improvement of Concrete Durability

- under Deicer and Freez-Thaw Environment, *Proceedings of the Korea Concrete Institute conference-Fall*, Vol. 17, No. 2, pp. 5233-5236.
- Lee, H.J. Zi, G., Shim, J.W., and Sim. J. (2012) Alkali Silica Reaction and Strength Property of Concrete containing Waste Glass Sludge, *Proceedings of the Korea Concrete Institute conference-Spring*, Muju, Vol. 24, No. 2, pp. 229-230.
- Park, S.-B. and Lee, B.-C. (2002) An Experimental Study on Mechanical Properties of Concrete with Waste Glass and Fly Ash, *Journal of Korean Society of Waste Management*, Vol. 19, No. 1, pp. 25-33.
- Park, S.-B., Lee, B.-C., and Kwon, H.-J., (2001) Alkali-Silica Reaction of Mortar Containing Waste Glass Aggregates, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 4, pp. 213-220.
- Yun, K.-K., Lee, J.-H., Yong, S.-U., and Jung, Y.-H. (1999) An Experimental Study on the Surface Scaling Resistance of Pavement Concretes Reinforced by Polypropylene Fibers, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. 1-4, pp. 603-612.

© Received February 22, 2013

© Revised March 4, 2013

© Accepted April 4, 2013