

복합열화 환경하에서의 고로슬래그미분말 사용 콘크리트의 내구성능 평가

A Durability Assessment on Complex Deterioration of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag Replacement

이 승 훈^{1)*}

김 형 두²⁾

Lee, Seung Hoon

Kim, Hyung Doo

Abstract

This paper presents the experimental results of frost durability characteristics including freezing–thawing and de-icing salt scaling of the concrete for gutter of the road and marine structure. Mixtures were proportioned with the three level of water–binder ratio(W/B) and three binder compositions corresponding to Type I cement with 0%, 30% and 50% GGBS(Ground granulated blast furnace slag) replacement. Also, two different solutions of calcium chloride were used to evaluate their effect on the frost durability resistance. Specially, in case of complex of freezing and thawing with salt and carbonation, the deterioration of concrete surface is evaluated. Test results showed that the BFS30 and BFS50 mixture exhibited higher durability and lower mass loss values than those made with OPC mix and the use of GGBS can be used effectively in terms of economy and frost durability of the concrete to be in complex deterioration. Therefore, the resistance to complex deterioration with freezing–thawing was strongly influenced by the strength and the type of cement.

Keywords : Freezing–thawing, Chloride attack, Scaling deterioration, Carbonation

1. 서론

최근 겨울철 도로, 노면 또는 건물 옥상의 적설 제거 및 동결방지를 위해 동결방지제로서 주로 염화나트륨, 염화칼슘, 염화마그네슘 등이 주성분인 제설제를 사용하고 있다(이병덕 등 2005). 이러한 염화물은 수분과 함께 콘크리트 내부에 침투하게 되며 반복적인 동결융해작용으로 콘크리트의 품질을 저하시키는 주요 원인 중의 하나이다. 또한 해안에 근접한 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받을 경우에는 내륙 콘크리트 구조물에 비해 내구성능 저하가 촉진된다고 알려져 있다(고경택 등, 2001). 이외에도 동해에 의해서 콘크리트는 표면열화 및 균열이 발생하게 되고 이때 물질의 이동성이 증대하게 되므로 중성화의 진행이 촉진될 가능성이 있다. 특히 해안지역의 경우는 동해, 건습반복, 염해가 복합적으로 작용하여 콘크리트 표면의 열화와 내부의 미세균열이 유발되어 중성화를 촉진시킬 가능성은 더욱 높다고 할 수 있다. 이처럼 콘크리트의 내구성 저하 현상은 단순 열화요인에 의한 표준적인 환경하에서 일어나는 경우는 매우 드물고, 여러 가지 열화요인

이 복합적으로 작용되어 일어난다.

따라서 본 연구에서는 동결융해, 염해 및 중성화가 복합적으로 작용하는 콘크리트 구조물의 내구성능을 평가하기 위하여 일반강도 콘크리트를 대상으로 동결수(수도수, 염수)를 달리하여 동결융해 시험을 실시함으로써 염해와 동결융해 복합작용에 의한 콘크리트의 열화를 평가하였고, 염해, 동결융해 및 중성화의 세가지 열화가 복합적으로 발생하는 복합열화에 대해서는 적절한 평가방법이 부재하여 동결수에 따른 동결융해 시험 후의 시험체에 대하여 중성화 촉진시험을 실시함으로써 복합열화에 의한 콘크리트 내구성능 저하 특성을 평가하고자 하였다.

2. 시험개요

2.1 사용재료

본 연구에 사용한 시멘트는 I종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고 고로슬래그미분말은 비중이 2.80이고 분말도 4,340cm²/g인 것을 사용하였다. 굵은골재는 쇄석으로 최

1) 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 수석연구원

2) 정희원, 동국대학교 박사과정

* Corresponding author : concrete@samsung.com 02-2145-6499

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Mix proportion

Type	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				SP (%)	
			W	C	BFS	S		G
58OPC	58	49.5	172	297	0	909	967	1.0
58BFS30				208	89	906	963	0.8
58BFS50				148	148	904	961	0.7
53OPC	53	48.5	175	330	0	874	967	0.9
53BFS30				231	99	870	963	0.8
48OPC	48	48.0	175	365	0	851	961	0.9
48BFS30				255	110	844	956	0.6

※ W/B : water-binder ratio

S/a : fine aggregate ratio

W : water

C : cement

BFS : Ground granulated blast furnace slag

S : fine aggregate

G : coarse aggregate

SP : superplasticizer

대치수는 25mm인 것을 사용하였으며, 잔골재는 세척사로 조립율이 2.78인 것을 사용하였다. 또한 혼화제는 나프탈렌계의 고성능 감수제와 AE제를 사용하였다.

2.2 배합비

Table 1은 본 실험에 사용된 콘크리트 배합비를 나타낸 것으로 물-결합재비(W/B) 58, 53, 48% 3개 수준으로 설정하였으며, 각각에 대하여 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 시멘트량의 30%와 50%를 고로슬래그미분말로 치환하여 배합을 설정하였다. 혼화제 사용량은 소오의 슬럼프와 특히 동결융해 평가에 있어서는 공기량이 중요한 변수이므로 목표 공기량(4.5±1.5%)을 만족할 수 있는 범위에서 결정하였다.

2.3 실험내용 및 방법

실험은 Table 2에 나타난 바와 같이 굳지 않은 콘크리트 물성시험(슬럼프, 공기량) 및 압축강도 특성을 평가하였으며, 내구성 평가를 위해서 동결융해와 동결융해를 받은 콘크리트 시험체에 대하여 중성화 촉진 시험을 실시하였다.

압축강도 측정을 위해서는 목표 슬럼프 및 공기량을 만족한 상태에서 시편제작을 하였으며 시험 전까지 수증양생 한 이후 재령 7, 14, 28, 56일에 각각 압축강도를 측정하였다. 콘크리트 동결융해 작용에 의한 내동해성 평가를 위한 시험방법은 KS F 2456(급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항성 시험법)의 표준시험방법에서 동결수로써 각각 수도수와 염화칼슘 농도가 8.0%인 염수를 각각 사용하였으며, 이때 염수의 농도는 기존의 연구문헌(김규용

Table 2 Test Method

Test	Method	Specimen	Notes
Slump	KS F 2402	-	immediate after mixing
Air content	KS F 2421	-	immediate after mixing
comp. strength	KS F 2405	φ10×20cm	7, 14, 28, 56 day (water curing)
freezing and thawing	KS F 2456	10×10×40cm	dynamic modulus of elasticity and quantity of scaling at 14 day (water curing)

등, 2005)을 참고하여 결정하였다. 동결융해시험 시에는 각 30사이클별로 동결융해시험 전의 동탄성계수로 부터 상대동탄성계수를 계산하였다. 또한 각 동결융해작용 30사이클 종료 후 콘크리트의 표면열화를 정량적으로 평가하기 위하여 콘크리트 스케일링량(cm³/cm²)을 Eq. (1)과 같이 계산하였다. 중성화 촉진 시험은 동결융해 후 온도 23℃, 습도 50% 및 CO₂농도 5% 조건하에서 소오의 측정재령까지 촉진 중성화를 시킨 후 중성화 깊이를 측정하였다.

$$V_{sn} = \frac{(V_o - V_n)}{A} \quad (1)$$

V_{sn} : n사이클에서의 스케일링량(cm³/cm²)

V_o : 동결융해시험 개시에서의 시험체 용적(cm³)

V_n : n사이클에서의 시험체 용적(cm³)

A : 동결융해 시험개시에서의 시험체 표면적(cm²)

여기에서 시험체의 용적은 Eq. (2)에 의하여 계산하였다.

$$V_n = (W_n - W_{wn}) \times \rho_w \quad (2)$$

V_n : n사이클에서 시험체의 용적(cm³)

W_n : n사이클에서의 시험체의 표면질량(g)

W_{wn} : n사이클에서의 시험체의 수중질량(g)

ρ_w : 물의 비중

3. 시험결과 및 고찰

3.1 기본물성 시험결과

Table 3은 콘크리트 배합별 초기 슬럼프, 공기량 및 재령별 평균압축강도 실험 결과를 나타낸 것이다.

콘크리트 배합 직후 측정된 슬럼프와 공기량은 각각 목표 슬럼프와 공기량을 모두 만족하였고 압축강도 측정결과에서는 물-결합재비가 58%에서 48%로 감소함에 따라 시멘트만을 사용한 콘크리트의 재령 28일 압축 강도

Table 3 Test results for concrete properties

Type	W/B (%)	Slump (mm)	Air (%)	Compressive strength(MPa)			
				7d	14d	28d	56d
58OPC	58	120	5.2	25.0	32.3	34.4	34.7
58BFS30		120	4.7	23.7	31.7	40.0	44.3
58BFS50		120	4.8	14.8	24.3	36.5	43.7
53OPC	53	145	5.0	29.4	38.2	41.9	42.7
53BFS30		150	4.6	27.4	35.4	45.1	49.2
48OPC	48	150	5.4	33.4	40.4	42.8	43.8
48BFS30		150	4.7	27.8	36.9	45.9	49.7

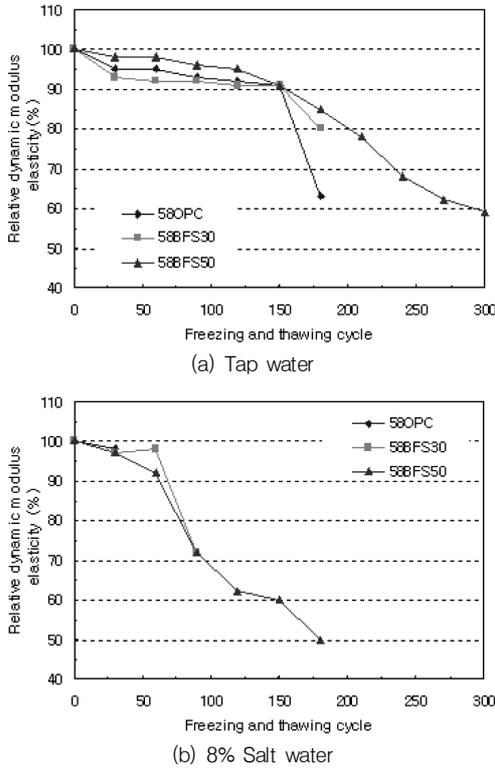


Fig. 1 Relative dynamic modulus of elasticity for W/B 58%

는 각각 34.4, 41.9, 42.8MPa로 증가하였다. BFS30 배합의 경우, 재령 14일까지는 OPC 배합보다 강도 발현은 느리지만 재령이 경과함에 따라 강도가 역전하여 재령 56 일에는 시멘트만을 사용한 콘크리트 보다 약 14~28% 정도 크게 나타났다. 한편, 물-결합재비가 58%로 동일하고 50%의 슬래그를 함유한 콘크리트(58BFS50)의 경우에는 초기 강도 발현이 매우 느리지만 재령 28일에는 OPC 배합과 재령 56일에는 BFS30 배합과 비슷한 강도 발현을 나타내었다.

3.2 동탄성계수 측정결과

Fig. 1과 Fig. 2는 물-결합재비가 동일한 조건에서 고로슬래그미분말 사용량(BFS 0, 30, 50%)에 따른 상대

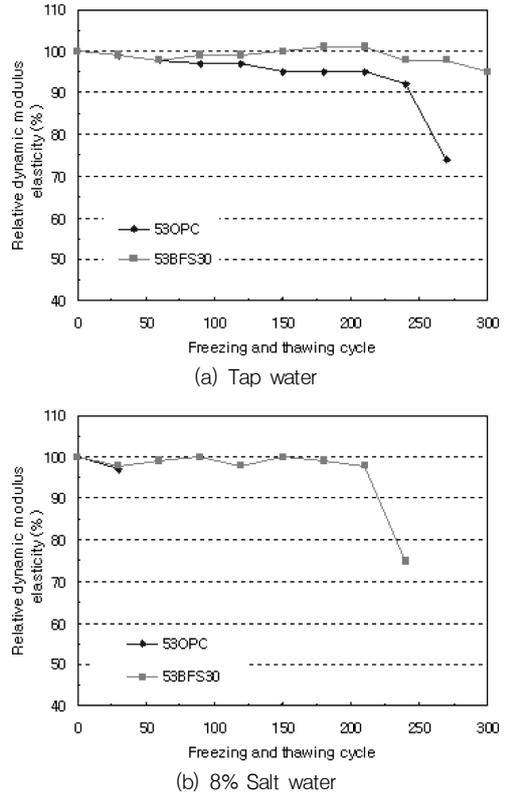


Fig. 2 Relative dynamic modulus of elasticity for W/B 53%

동탄성계수의 변화를 나타내었다.

물-결합재비 53, 58%인 배합에서 고로슬래그미분말을 사용한 배합의 압축강도가 낮음에도 불구하고 동일한 동결융해 사이클에서의 상대동탄성계수값이 모두 큰 경향을 나타내었고, 특히, BFS50의 경우에는 염수조건에서도 180사이클에 상대동탄성계수 50%를 나타내었다. 이것은 고로슬래그미분말의 첨가로 $Ca(OH)_2$ 를 포졸란 반응에 의해 감소시킴과 동시에 조직의 치밀화를 통해 우수한 동결융해 저항성을 확보한 것으로 보인다(정용 등, 1992).

3.3 스케일링 측정결과

Table 4와 5는 OPC 배합과 시멘트의 30%를 고로슬래그미분말로 치환한 BFS30으로 동일한 조건에서 물-결합재비에 따른 각 배합별 표면스케일링량의 변화를 나타내었다.

전반적인 스케일링 발생 경향은 OPC 배합의 경우 물-결합재비 53% 이하에서는 300 사이클 동안 표면스케일링량이 점차적으로 증가하여 수도수인 경우에는 최대 $0.08 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$, 염수의 경우에는 최대 $0.16 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 로 2배 정도 증가하였으나 물-결합재비가 58%인 경우에는 특정 사이클 (수도수 180, 염수 30사이클)에서 표면스케일링이 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다.

반면, BFS30 배합의 경우에는 OPC 배합에 비해 표

Table 4 Durability factor and maximum scaling quantity for W/B of 58%

W/B	58%					
	OPC		BFS30		BFS50	
Binder type						
Freezing water	tap water	salt water	tap water	salt water	tap water	salt water
Cycles	180	30	180	90	180	180
Max. scaling(cm^3/cm^2)	0.43	0.42	0.22	0.53	0.08	0.16
Surface condition						

Table 5 Durability factor and maximum scaling quantity for W/B of 53% and 48%

W/B	53%				48%			
	OPC		BFS30		OPC		BFS30	
Binder type								
Freezing water	tap water	salt water	tap water	salt water	tap water	salt water	tap water	salt water
Cycles	270	30	300	240	300	300	210	300
Max. scaling(cm^3/cm^2)	0.08	0.16	0.10	0.20	0.03	0.10	0.05	0.05
Surface condition								

면 스케일링량이 전체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 물-결합재비가 58%인 경우에는 150사이클까지 OPC 배합과 유사한 정도의 스케일링량을 보였으나 이후 감소하는 경향을 보였으며, 물-결합재비가 53, 48%로 낮아지는 경우에는 동일한 사이클을 기준으로 할 때 OPC 배합에 비해 현저히 스케일링량이 감소하는 경향을 나타내었다.

특히, BFS50 배합의 경우 물-결합재비 58%로 물-결합재비가 높은 조건에서도 스케일링량이 감소되어 염해에 의한 동결융해 저항성이 우수함을 확인할 수 있었다. 이와 같이 콘크리트의 스케일링 저하와 관련된 내구성능 저하현상은 주로 동결융해와 염해의 복합작용을 받는 경우에 발생되며(Pigeon, M, 1992), 이러한 현상의 원인은 동결융해 이외 작용 이외에도 해수 중 용존이온이 콘크리트 내부로 침투하여 C_3A 및 시멘트 수화물과 반응하여 최종적으로 에트링가이트가 생성되는 반응과정을 통하여 팽창

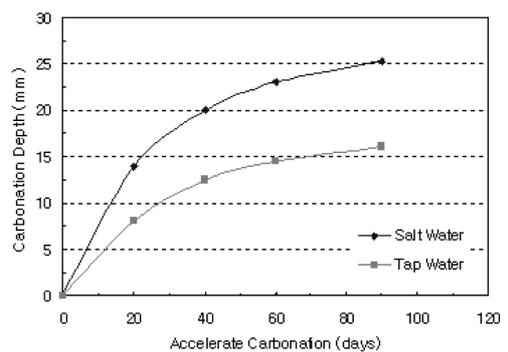


Fig. 3 Test result for accelerate carbonation after freezing and thawing test for w/b 48%

을 일으켜 콘크리트의 성능이 저하된다(정용 등, 1992). 따라서 고로슬래그미분말의 사용은 콘크리트 내부 조직을 치밀화하여 해수 중 용존이온의 침투를 억제함으로써 해수중 동결융해에 저항성이 향상되는 것이다.

3.4 동결융해 후 촉진 중성화 시험결과

Fig. 3은 물-결합재비 48% 배합을 대상으로 동결수가 염수인 동결융해의 작용 후에 중성화 촉진을 실시한 결과로, Fig. 3에 나타난 바와 같이 OPC 배합의 경우 염수 동결융해 후 표면스케일링 및 세공구조가 파괴되어 투기저항성능이 저하됨에 따라 고로슬래그미분말을 사용한 배합에 비해 중성화가 크게 촉진됨을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

동결융해, 염해 및 중성화의 복합열화 환경에 있는 일반강도 콘크리트의 내구성 평가를 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동결수를 염수로 사용한 해수 동결융해를 모사하는 내구성 평가에서는 물-결합재비가 낮거나 동일한 물-결합재비 수준에서도 고로슬래그미분말을 사용한 배합의 경우 염해와 동결융해가 동시에 복합적으로 발생하는 환경에서도 우수한 저항성능을 보였다.

2) 해수 동결융해 이후의 중성화 촉진 평가에서도 고로슬래그미분말을 사용한 경우 해수 동결융해에 의한 저항성이 우수하여 표면 스케일링 및 내부조직의 미세균열이 적게 발생되어 중성화 촉진 평가에서도 우수한 내구성을 보임을 확인 할 수 있었다.

이상의 결과로부터 동결융해를 포함한 복합열화 환경에서는 시멘트의 종류 및 콘크리트의 강도 등이 큰 영향을 미치므로 복합열화 환경에서의 충분한 내구성 확보를 위해서는 최소한의 설계기준강도의 확보와 고로슬래그미분말 등 적절한 시멘트 결합재의 선정이 무엇보다 중요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, “동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성 저하 평가”, 콘크리트학회 논문집, 제13권 4호, 2001, pp.397-405.
2. 김규용, 박찬규, 김한준, 손유신, 이승훈, “동결방지제에 의한 콘크리트의 스케일링 열화”, 콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2005, pp.117-180.
3. 이병덕, 윤병성, “제설제 및 동결융해 환경하에서 콘크리트의 내구성 증진방안에 관한 연구”, 콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2005, pp.523-526.
4. 정용, 김원기, 정재동, 한기성, 최상훈, “해수 환경 하 콘크리트 경화체의 동결융해 저항성에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, 제4권 3호, 1992, pp.157-166.
5. Pigeon, M and Pleau, R, “Durability of Concrete in Cold Climates”, E&FN SPON, 1992, pp.34-37.

(접수일자 : 2009년 10월 28일)
(심사완료일자 : 2010년 1월 15일)

요 지

본 연구는 동결융해, 염해 및 중성화가 복합적으로 작용하는 콘크리트 구조물의 내구성능을 평가하기 위하여 일반강도 콘크리트를 대상으로 동결수를 달리하여 동결융해 시험을 실시함으로써 염해와 동결융해 복합작용에 의한 콘크리트의 열화를 평가하였고, 염해, 동결융해 및 중성화의 세가지 열화가 복합적으로 발생하는 복합열화에 대해서는 적절한 평가방법이 부재하여 동결수에 따른 동결융해 시험 후의 시험체에 대하여 중성화 촉진시험을 실시함으로써 복합열화에 의한 콘크리트 내구성능 저하 특성을 평가하고자 하였다. 본 연구를 통하여 동결수의 종류나 물-결합재비 수준과 무관하게 고로슬래그미분말을 사용한 배합의 경우 염해와 동결융해가 동시에 복합적으로 발생하는 환경에서도 우수한 저항성능을 보이는 결과를 나타내므로 동결융해를 포함한 복합열화 환경에서 충분한 내구성 확보를 위해서는 최소한의 설계기준강도의 확보와 고로슬래그미분말 등 적절한 시멘트 결합재의 선정이 무엇보다 중요하다는 결론을 얻었다.

핵심 용어 : 동결융해, 염해, 표면열화, 중성화