

광물질혼화재를 적용한 콘크리트의 스케일링 저항성 평가

Scaling Resistance of Cement Concrete Incorporating Mineral Admixtures

이 승 태 Lee, Seung-Tae
박 세 호 Park, Se-Ho

정회원 · 군산대학교 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : stlee@kunsan.ac.kr)
군산대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : yegam88@nate.com)

ABSTRACT

PURPOSES : The scaling of a concrete surface caused by the combined effects of frost and de-icing salts is one of the main reasons for the need to repair transportation infrastructures in cold-climate regions. This study describes the results of attempts to determine the scaling resistance of concrete incorporating mineral admixtures such as fly ash, GGBFS, and silica fume, and subjected to the actions of frost and salt.

METHODS : Conventionally, to evaluate the fundamental properties of concrete, flexural and compressive strength measurements are regularly performed. Based on the ASTM C 672 standard, concrete is subjected to 2%, 4%, and 8% CaCl₂ salt solutions along with repeated sets of 50 freeze/thaw cycles, and the scaling resistance was evaluated based on the mass of the scale and a visual examination.

RESULTS : It was observed that silica fume is very effective in enhancing the scaling resistance of concrete. Meanwhile, concrete incorporating GGBFS exhibited poor resistance to scaling, especially in the first ten freeze/thaw cycles. However, fly ash concrete generally exhibited the maximum amount of damage as a result of the frost-salt attack, regardless of the concentrations of the solutions.

CONCLUSIONS : It can be concluded that the scaling resistance of concrete is highly dependent on the type of the mineral admixture used in the concrete. Therefore, to provide a durable concrete pavement for use in cold-climate regions, the selection of a suitable binder is essential.

Keywords

mineral admixtures, concrete, scaling resistance, ASTM C 672, freeze/thaw cycles

Corresponding Author : Lee, Seung-Tae, Professor
Department of Civil Engineering, Kunsan National University,
558 Daehak-ro, Kunsan, Jeonbuk, 573-701, Korea
Tel : +82. 63. 469. 4877 Fax : +82. 63. 469. 4791
E-mail : stlee@kunsan.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Jan. 29, 2015 Revised Jan. 30, 2015 Accepted Feb. 12, 2015

1. 서론

현재, 우리나라의 경우 시멘트콘크리트 포장의 설계 기술은 지속적인 발전을 거듭하고 있는 반면 포장재료 및 배합설계에 관련된 기술적 노하우는 선진외국에 비하여 다소 뒤쳐져있는 실정이다. 예를 들면, 캐나다 온타리오주 PCA 및 미국 텍사스 교통국의 DMS(Department of Materials Specification) 시방서 규정은 우리나라에 비하여 시멘트콘크리트 포장재료

로써 광물질혼화재의 활용에 대하여 매우 구체적으로 언급하고 있으며 관련 기술적 데이터도 많이 확보하고 있다(Lee et al., 2010).

광물질혼화재(예: 고로슬래그미분말, 실리카흙, 플라이애쉬, 메타카올린 등)는 콘크리트의 작업성, 장기강도, 수화발열 특성, 내구성 등을 향상시킬 뿐만 아니라 일부재료는 경제적으로 효율성이 높아서 콘크리트용 시멘트 대체재료로써 그 사용량이 점차 증대하고 있다. 그

러나 시멘트콘크리트 포장재료로서 광물질혼화제의 적용성을 검토한 연구결과는 많지 않으며 그 연구내용도 극히 제한적인 것으로 알려져 있다.

특히, 우리나라는 겨울철 제설을 위한 제설제 살포 및 동결융해작용으로 인한 콘크리트 포장의 내구성능저하, 특히 스케일링(scaling) 현상이 많이 보고되고 있으며 이는 교통시설 이용자의 편의성 감소 및 유지관리비용 증가를 초래하게 된다. 주지하다시피, 스케일링은 동해 및 염해의 복합작용으로 발생하는 표면박리, 잔골재의 탈락 등으로 나타나는 콘크리트의 대표적인 성능저하 현상이다. 이러한 콘크리트의 스케일링 현상은 콘크리트의 강도, 염용액의 종류 및 농도, 연행공기량, 블리딩량 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Valenza & Scherer, 2007). 뿐만 아니라, 사용되는 결합재의 종류에 따른 콘크리트의 스케일링 저항성도 각각 상이한 것으로 보고되고 있으며, 광물질 혼화제를 적용한 혼합시멘트계 콘크리트의 스케일링 저항성에 대한 연구도 많이 수행되어 왔으나 연구자마다 연구결과가 각각 상이하여 많은 논란의 여지를 내포하고 있다.

특히, 플라이애시를 적용한 콘크리트의 스케일링에 대한 연구는 전세계적으로 다수 보고되고 있으며 (Bilodeau & Malhotra, 1992; Heede et al., 2013; Nowak-Michta, 2013; Kosior-Kazberuk, 2013), 이 중 Bilodeau & Malhotra(1992)는 콘크리트의 스케일링 저항성에 대한 플라이애시의 부(-)효과에 대하여 실험적으로 입증하였다.

또, Valenza & Scherer(2007) 및 Deja(2003)는 콘크리트의 스케일링 저항성에 미치는 고로슬래그의 영향에 대한 연구를 수행하였으며 콘크리트 경화 시 고로슬래그의 유리질(glassy) 특성으로 인하여 콘크리트의 표면이 상대적으로 약한 탓으로 인하여 노출 초기에 동해-염해 복합작용에 의하여 스케일링이 많이 발생하나 장기재령으로 갈수록 고로슬래그의 잠재수경성으로 인하여 조직구조가 치밀해져 콘크리트의 스케일링 저항성은 증가한다고 보고하고 있다.

한편, 실리카흙을 사용한 콘크리트는 포졸란반응으로 인한 C-S-H의 다량 생성, 조직구조의 치밀화, 블리딩수의 저감, 표면강도 증대 등으로 인하여 스케일링 저항성이 향상되는 반면, 연행공기의 확보를 위한 적절한 양의 고성능감수제의 사용이 중요하다고 보고하고 있다 (Sorensen, 1983; Johnston, 1994; Cwirzen & Penttala, 2005).

본 연구에서는 광물질혼화제를 적용한 콘크리트 포장

의 내구성을 평가하기 위한 일환으로써, ASTM C 672에 준한 스케일링 실험을 수행하였다. 아울러, CaCl₂ 용액의 농도를 3단계(2%, 4% 및 8%)로 조절함으로써 염용액(slat solution) 농도에 따른 콘크리트의 스케일링 저항성을 실험적으로 고찰하였다. 실험 및 분석을 통하여 도출된 결과를 이용함으로써 겨울철 제설제 살포 환경에서 고내구적인 콘크리트 포장용 재료를 선정하기 위한 기초자료를 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 실험개요

2.1. 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 KS L 5201에 준하는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)이며 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 다음 Table 1과 같다. 또 혼합시멘트 콘크리트 제조를 위하여 플라이애시(이하 FA), 고로슬래그미분말(이하 SG) 및 실리카흙(이하 SF)을 시멘트에 대하여 적절한 비율(FA 20%, SG 50%, SF 8%)로 각각 대체하여 사용하였으며, 광물질혼화제의 화학성분 및 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 잔골재는 부순모래를 사용하였으며, 굵은골재는 부순돌을 사용하였다. 본 실험에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 또한, 콘크리트의 적절한 유동성(슬럼프 120±15mm) 및 공기량(5±1.0%) 확보를 위하여 PC계열 고성능감수제(SP) 및 AE제(AEA)를 각각 사용하였다.

Table 1. Chemical Composition and Physical Properties of Cement and Mineral Admixtures

Items Types	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	lg. loss	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)
OPC	19.8	4.8	3.1	61.5	2.9	2.8	2.9	3.15	3,480
FA	57.6	25.5	6.1	3.4	0.9	-	4.3	2.39	3,590
SG	31.7	14.5	0.4	41.7	5.4	2.1	2.6	2.92	4,450
SF	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	-	2.3	2.20	204,700

Table 2. Physical Properties of Aggregates

Items Types	G _{max} (mm)	Absorption (%)	F.M.	Density (g/cm ³)
Sand	-	1.14	2.9	2.62
Gravel	25	0.85	-	2.67

2.2. 콘크리트 배합

본 실험은 광물질혼화제를 사용하지 않은 기준배합

(OPC 콘크리트)과 OPC에 FA, SG 및 SF를 각각 20%, 40% 및 8%를 대체한 혼합시멘트계 콘크리트(FAC, SGC 및 SFC 콘크리트) 등 4배합의 콘크리트를 제조하여 실험을 수행하였으며 각 콘크리트의 배합특성을 나타낸 것이 Table 3이다. 믹싱된 4종류 콘크리트는 제조 1일 후 탈형하여 20±3℃ 조건에서 각각 수중양생하였다.

Table 3. Concrete Mixtures

Sym bol	G _{max} (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)								
				W	OPC	FA	SG	SF	S	G	SP*	AEA**
OPC	25	46.7	41.4	187	400	-	-	-	668	946	0.20	0.50
FAC	25	46.7	41.4	187	320	80	-	-	659	933	0.23	1.00
SGC	25	46.7	41.4	187	240	-	160	-	664	939	0.17	0.80
SFC	25	46.7	41.4	187	368	-	-	32	663	939	0.55	0.15

* SP: wt. of binder, %

** AEA: wt. of SP, %

2.3. 실험방법

- 1) 휨강도 : 수중에서 표준양생한 100×100×400 mm 각주형 공시체를 대상으로 KS F 2408에 준하여 콘크리트의 휨강도를 측정하였다.
- 2) 압축강도 : 수중에서 표준양생한 ø100×200mm 원주형 공시체를 대상으로 KS F 2405에 의하여 재령 7, 28 및 78일에서 압축강도를 측정하였다. 각 재령별로 3개 콘크리트 공시체의 압축강도를 측정하였으며 그 평균값을 채택하였다.
- 3) 스케일링 저항성 : 콘크리트의 스케일링 저항성을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 ø100×70mm 콘크리트 공시체를 제작하여, 수중 및 기건양생을 각각 14일씩 실시하였으며, ASTM C 672에 준하여 Table 4와 같은 조건으로 매일 1사이클씩 총 50사이클의 동결-융해 반복작용을 실시하였다. 또 매 10사이클마다 콘크리트 표면에서 박리된

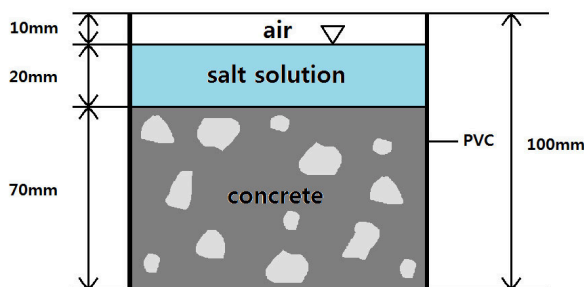


Fig. 1 Schematic Drawing of Concrete Specimen for Scaling Test

Table 4. Conditions for Scaling Resistance Test

Items	Descriptions
Exposure solution	2, 4 and 8% CaCl ₂ salt solution
Precuring conditions	14 days in moisture and 14 days in air
Temperature	Freezing : -18±3℃ for 16~18h Thawing : 20±3℃ for 6~8h
Intervals for scaled-off materials measurement	Every 10 cycles (total 50 cycles)

스케일링량을 측정하였으며, 최종 50사이클 후 콘크리트의 박리, 탈락 및 골재노출 정도에 대한 육안검사를 실시하였다. 실험에서 사용된 CaCl₂ 용액은 매 10사이클마다 증류수에 reagent급 시약을 용해하여 새로운 용액으로 교체하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 강도특성

본 실험에서 사용한 4종류 콘크리트의 재령별 휨강도 특성을 나타낸 것이 Fig. 2이다. 이 그림으로부터 OPC 및 SFC 콘크리트는 초기재령(재령 7일)에서 휨강도 발현이 다소 크게 나타났으나 FAC 및 SGC 콘크리트는 휨강도가 상대적으로 작게 나타남을 확인할 수 있다. 반면, 재령 28일에서 SFC 콘크리트의 휨강도는 약 8.3 MPa를 나타내었으며 OPC, FAC 및 SGC 콘크리트는 동일재령에서 약 7.3~7.9 MPa 정도의 강도 값을 나타내었다. 이러한 경향은 재령 78일에서도 유사하게 나타났으며, SFC 콘크리트는 실리카흙의 필러효과(filler effect), 포졸란반응(pozzolanic reaction), 천이지대 개선효과(ITZ densifying effect) 등으로 인하여 장기 강도가 다른 콘크리트 배합에 비하여 개선되는 효과를 나타내었다(Siddique, 2011).

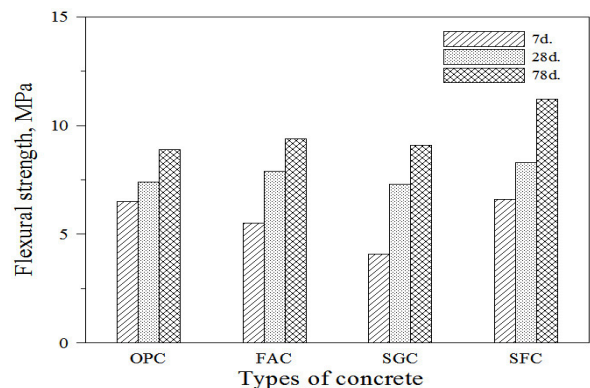


Fig. 2 Flexural Strength of Concrete

한편, 콘크리트의 압축강도 발현 특성을 나타낸 것이 Fig. 3으로써 재령에 관계없이 SF 콘크리트의 압축강도 발현이 가장 우수하게 나타남을 알 수 있으며 OPC, FAC 및 SGC콘크리트의 압축강도 발현 경향은 Fig. 2에 나타난 콘크리트의 휨강도 발현 경향과 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다. 본 연구의 범위에서 콘크리트의 강도특성을 실험적으로 고찰한 결과 광물질 혼화재를 적용한 콘크리트의 강도특성은 적용한 광물질 혼화재의 종류에 따라 다르게 나타났으며, 대체적으로 SF를 사용한 콘크리트의 강도가 크게 나타나는 경향임을 확인할 수 있다.

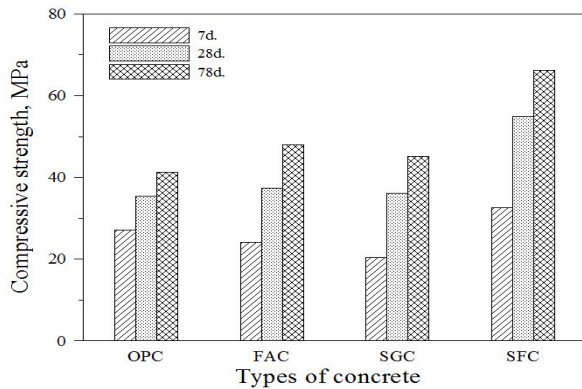


Fig. 3 Compressive Strength of Concrete

3.2. 스케일링 저항성

ASTM C 672에 준하여 광물질혼화재를 적용한 콘크리트의 스케일링 저항성 실험결과를 나타낸 것이 각각 Fig. 4~6이다. Fig. 4는 2% CaCl₂ 용액에 노출된 콘크리트의 스케일링 저항성 실험결과를 나타낸 것으로서 OPC, SGC 및 SFC 콘크리트의 경우 약 1.3kg/m² 이하의 작은 스케일링량을 나타낸 반면 FAC는 50사이클에서 약 11.4kg/m² 정도의 매우 많은 스케일링량을 나타내었다. 이와 같이 FAC 콘크리트의 스케일링 저항성이 상대적으로 낮은 이유는 Bilodeau & Malhotra(1992)의 연구결과에서 보고된 바와 같이 균지않은 FAC 콘크리트의 블리딩량이 상대적으로 많은 탓으로 인하여 경화한 FAC 콘크리트의 표면열화가 많이 발생된 것으로 판단된다. 한편, Fig. 5는 4% CaCl₂ 용액에 노출된 콘크리트의 스케일링량을 나타낸 것으로서, OPC 및 SGC 콘크리트에 비하여 SFC 콘크리트의 우수한 스케일링 저항성을 확인할 수 있으며 FAC 콘크리트는 50사이클에서 약 14.6kg/m² 정도로써, 본 연구범위에서 최대 스케일링량으로 관찰되었다. 이러한 경향은 8% CaCl₂ 용액을 적용한 Fig. 6의 결과와도 매우 유사함을 알 수

있으나 대체적으로 4% CaCl₂ 용액과 비교하면 콘크리트의 스케일링량이 약간 낮은 값을 나타내었다.

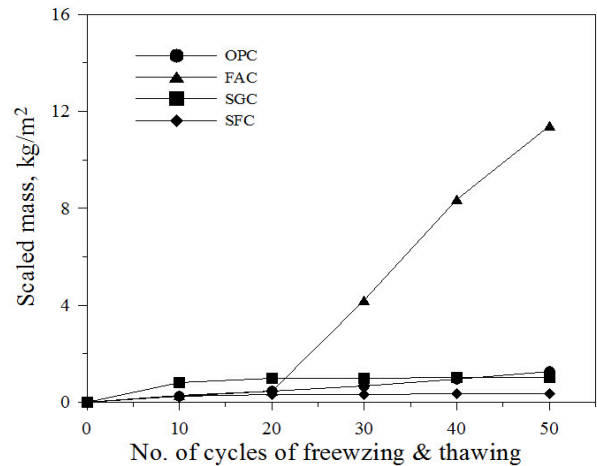


Fig. 4 Scaled Mass of Concrete Exposed to 2% CaCl₂ Solution

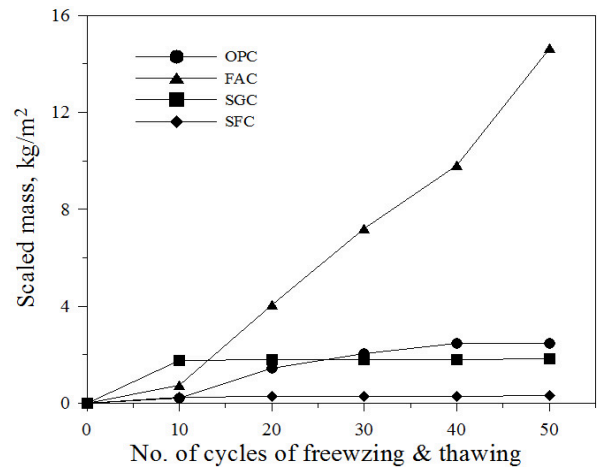


Fig. 5 Scaled Mass of Concrete Exposed to 4% CaCl₂ Solution

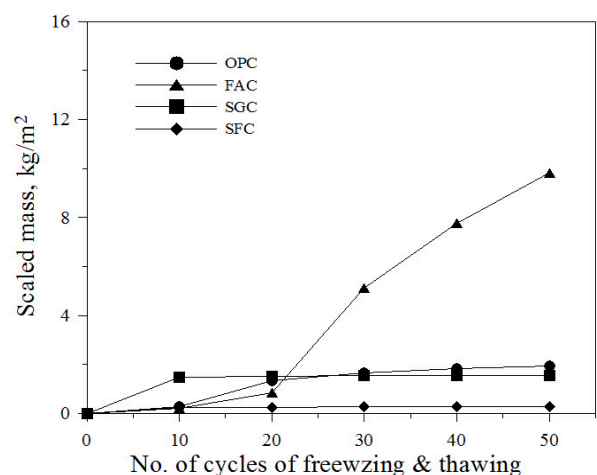


Fig. 6 Scaled Mass of Concrete Exposed to 8% CaCl₂ Solution

한편, 50사이클 노출 후 콘크리트의 스케일링 저항성에 대한 CaCl₂ 용액 농도의 영향을 비교하여 나타낸 것이 Fig. 7로써, SFC 콘크리트는 3종류 CaCl₂ 용액에서 스케일링량이 약 0.3kg/m² 정도로써 노출용액의 농도에 관계없이 우수한 스케일링 저항성이 관찰되었으나 OPC, FAC 및 SGC 콘크리트는 4% CaCl₂ 용액에서 스케일링량이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상이 나타난 이유는 Scherer & Valenza (2005)의 연구결과에서도 보고되었듯이 CaCl₂ 용액조건에서 콘크리트의 동해-염해 복합작용에 의한 최대열화(maximum damage)를 일으키는 농도(pessimum concentration)는 약 4% 전후인 것으로 판단된다.

한편, 앞선 Fig. 4~6에 나타난 바와 같이 4종류 콘크리트의 스케일링량은 노출 사이클에 대하여 선형적으로 증가하지 않는 것으로 조사되었다. 특히, FAC 콘크리트는 2% 및 8% CaCl₂ 용액에 노출될 경우 20사이클

이후에 스케일링량이 급격하게 증가하였으며 SGC 콘크리트는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 초기 10사이클내에서 스케일링량이 대체적으로 많이 나타나는 것으로 관찰되었다. 이는 Stark & Ludwig의 연구결과(1994)에도 나타났듯이 SG의 비정질상(amorphous phase)의 수화특성으로 인하여 콘크리트 표면경화가 늦어져 초기 스케일링이 지배적인 것으로 판단된다. 그러나 SG의 잠재수경성의 영향으로 10사이클 이후의 장기재령에서는 콘크리트의 조직구조의 밀실화로 인하여 스케일링량의 증가가 적은 우수한 저항성을 나타내었다 (Valenza & Scherer, 2007).

ACI Building Code 318(2011)에서는 동결융해작용을 받는 제설제 살포환경에 노출된 콘크리트의 설계기준강도는 4,500psi(≒31MPa) 이상으로 규정하고 있으며 이와 관련하여 많은 연구자들에 의하여 콘크리트의 강도와 스케일링 저항성의 관계를 규명하기 위한 일련의 연구가

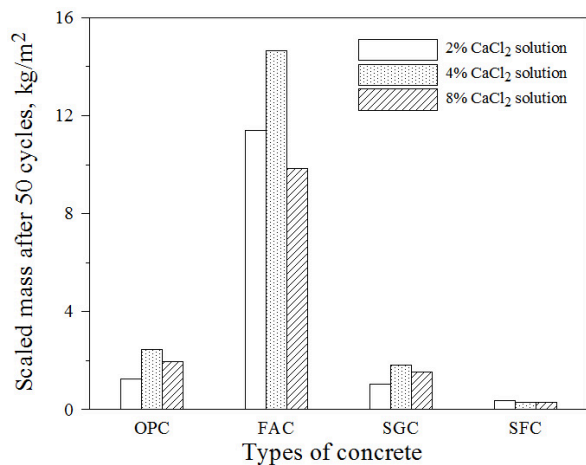


Fig. 7 Comparison of Scaled Mass of Concrete after 50 Cycles

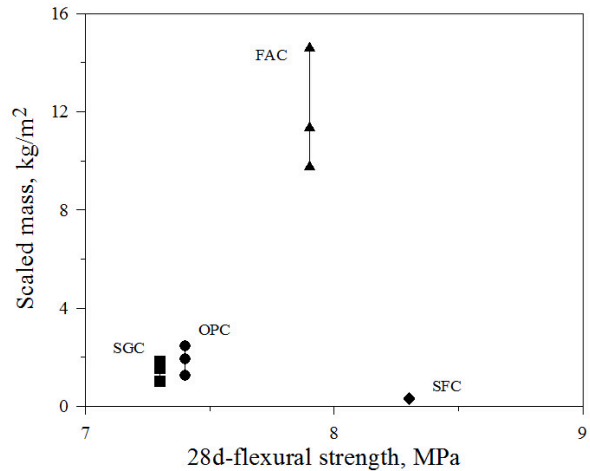


Fig. 9 Relationship between Flexural Strength and Scaling Resistance

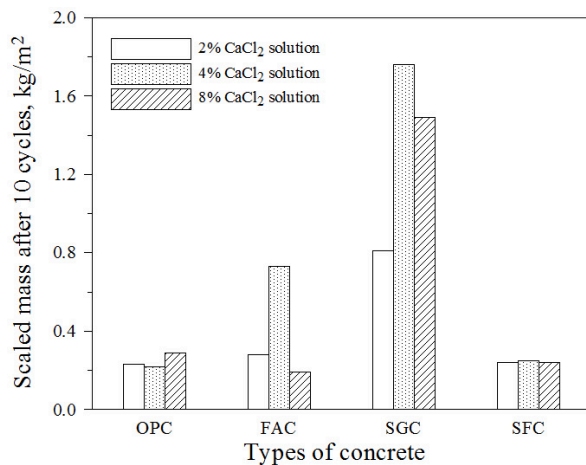


Fig. 8 Comparison of Scaled Mass of Concrete after 10 Cycles

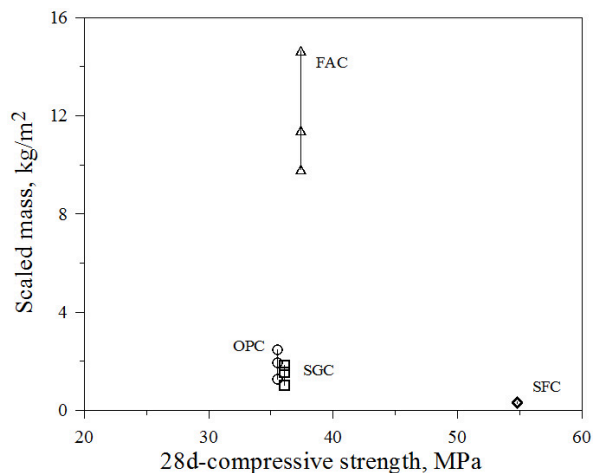








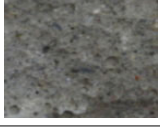





Fig. 10 Relationship between Compressive Strength and Scaling Resistance

수행되기도 하였다(Pigeon & Pleau, 1995; Bilodeau & Malhotra, 1992). Fig. 9 및 10은 콘크리트의 재령 28일 휨강도 및 압축강도와 스케일링 저항성과의 관계를 도시한 것으로써 콘크리트의 강도특성과 스케일링 저항성은 상관관계가 그다지 높지 않았으며 본 연구의 실험결과에 의하면 스케일링 저항성에 대한 결합재의 영향이 보다 밀접한 상관관계가 있는 것으로 판단된다.

3.3. 외관조사

Table 5는 2, 4 및 8% CaCl₂ 용액에 노출된 콘크리트의 동결융해 50사이클 후 콘크리트의 표면을 나타낸 것이다. 이 표에 제시된 바와 같이 OPC 콘크리트는 2% 및 8% 염용액에 노출된 콘크리트에 비하여 4% 염용액에서 표면 스케일링 및 골재탈락으로 인한 열화가 더 심하게 나타났으며 이러한 경향은 FAC 콘크리트에서 더욱 두드러진 경향으로 나타났다. 특히, 4% CaCl₂ 용액에 노출된 FAC 콘크리트는 콘크리트 표면층의 전면적인 박리뿐만 아니라 다수의 굵은골재 탈락도 관찰됨으로써 가장 심한 내구성 저하가 발생함을 알 수 있다. 한편, SFC 콘크리트는 염용액 농도에 관계없이 나머지 3종류 콘크리트에 비하여 표면 스케일링이 상대적으로 작게 나타났으며 페이스트 부분에 대한 미세한 열화만 관찰되었으며 골재노출은 거의 발생하지 않았다. 이상의 콘크리트의 표면 성능저하는 Fig. 4~6에 나타난 콘크리트의 스케일링량 실험결과와도 어느 정도 일치하는 것으로 판단된다.

Table 5. Surface Scaling of Concrete after Freezing and Thawing of 50 Cycles

Types	Concentration of CaCl ₂ salt solution		
	2%	4%	8%
OPC			
FAC			
SGC			
SFC			

4. 결론

본 연구는 콘크리트 포장의 내구성능 중 스케일링 저항성에 대한 광물질혼화재의 영향을 실험적으로 평가한 것으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 콘크리트의 강도특성을 고찰한 결과, 초기재령에서 FAC 및 SGC 콘크리트의 휨강도는 상대적으로 작게 나타나는 경향을 나타내었으나 장기재령에서는 OPC 콘크리트와 유사한 휨강도 특성을 나타내었다. 이러한 경향은 콘크리트의 압축강도 발현특성에서도 유사하게 나타났다. 반면, 실리카흄을 혼합한 SFC 콘크리트는 다른 3종류 콘크리트에 비하여 휨강도 및 압축강도 발현이 좋은 우수한 특성을 나타내었다.
2. 광물질혼화재를 적용한 콘크리트의 스케일링 저항성은 염용액 농도에 관계없이 FAC 콘크리트가 가장 낮은 것으로 나타났으며 대체적으로 SFC의 스케일링 저항성이 우수하였다. 이러한 결과는 50사이클 후 콘크리트 표면에 대한 외관조사 결과와도 거의 일치하였다. 또한, FAC 콘크리트에 비하여 SGC 콘크리트의 스케일링 저항성은 염용액 농도에 관계없이 우수하게 나타났으나 SGC 콘크리트의 스케일링은 거의 초기 노출재령에서 발생한 것으로 조사되었다. 한편, 염용액 농도별 콘크리트의 스케일링량을 측정 한 결과 SFC를 제외하면 모든 콘크리트에서 4% CaCl₂ 용액에서 스케일링량이 가장 크게 나타남으로써 본 연구범위에서 최대 표면열화가 발생하는 농도는 약 4% 전후인 것으로 판단된다.
3. 결론적으로 ASTM C 672에 준하여 수행된 콘크리트의 스케일링 저항성은 콘크리트의 강도특성과는 그다지 밀접한 상관관계가 없었으며 연행공기량이 유사한 조건에서 동해 및 염해의 복합작용에 의한 콘크리트의 내구성은 적용되는 광물질혼화재의 종류에 따라 다르게 나타났다. 한편, 콘크리트의 스케일링 저항성 향상을 위한 광물질혼화재의 최적 배합에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 교통물류사업 “온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구” 연구과제에서 연구비를 지원받아 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다.

BIBLIOGRAPHY

- ACI Committee.(2011), "ACI Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- Bilodeau, A. and Malhotra, V.M.(1992), "Concrete incorporating high volumes of ASTM Class F fly ashes: mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to chloride-ion penetration", ACI Special Publication SP-132, American Concrete Institute, Detroit, pp. 319-349.
- Cwirzen, A. and Penttala, V.(2005), "Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, pp. 671-679.
- Deja, J.(2003), "Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes", Cement and Concrete Composites, Vol. 25, No. 3, pp. 357-361.
- Heede, P.V. Furniere, J. and Belie, N.D.(2013), "Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete", Cement and Concrete Composites, Vol. 37, pp. 293-303.
- Johnston, C.D.(1994), "Deice salt scaling resistance and chloride permeability", Concrete International, Vol. 16, No. 8, pp. 48-55.
- Kosior-Kazberuk, M.(2013), "Surface scaling resistance of concrete with fly ash from Co-combustion of coal and biomass", Procedia Engineering, Vol. 57, 2013, pp. 605-613.
- Lee, S.T. Lee, D.H. and Lee, J.J.(2010), "Performance of cement concrete pavement incorporating mineral admixtures", International Journal of Highway Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 113-119.
- Nowak-Michta, A.(2013), "Water-binder ratio influence on de-icing salt scaling of fly ash concretes", Procedia Engineering, Vol. 57, pp. 823-829.
- Pigeon, M. and Pleau, R.(1995), "Durability of concrete in cold climates", E&FN Spon, London.
- Scherer, G.W. and Valenza, J.J.(2005), "Mechanism of frost damage", Materials Science of Concrete, Vol. 7, pp. 209-246.
- Siddique, R.(2011), "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55, No. 11, pp. 923-932.
- Sorensen, E.G.(1983), "Freezing and thawing resistance of condensed silica fume concrete exposed to deicing chemicals", ACI Special Publication, SP-79, pp. 709-718.
- Stark, J. and Ludwig, H.M.(1994), "Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concretes containing cement rich in granulated blast-furnace slag", ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 1, pp. 47-55.
- Valenza, J.J. and Scherer, G.W.(2007), "A review of salt scaling: II. Mechanism", Cement and Concrete Research, Vol. 37, No. 4, pp. 1022-1034.