

광물질혼화재를 적용한 시멘트콘크리트 포장의 성능 평가

Performance of cement concrete pavement incorporating mineral admixtures

이 승 태 Lee, Seung-Tae	정희원 · 군산대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : stlee@kunsan.ac.kr)
이 다 현 Lee, Da-Hyun	비희원 · 군산대학교 토목공학과 · 공학석사
이 재 준 Lee, Jae-Jun	정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 · 공학박사 (E-mail : yijaejun@kict.re.kr)

ABSTRACT

This study presents experimental findings on the performance of cement concrete pavement incorporating mineral admixtures such as ground granulated blastfurnace slag and silica fume. Flexural strength, compressive strength, charge passed, diffusion coefficient of chloride ions and initial surface absorption of cement concrete pavement incorporating mineral admixtures were periodically measured and the corresponding results were compared to those of plain concrete pavement. As a result, strength behaviors of concrete pavement were dependent on the types of mineral admixtures. However, it was true that incorporation of silica fume had a beneficial effect on compressive strength development. Furthermore, the application of mineral admixtures led to a lower diffusion coefficient of chloride ions compared to plain concrete pavement. Based on the experimental results, the present study would be helpful to design high-performance cement concrete pavement.

KEYWORDS

cement concrete pavement, mineral admixtures, mechanical properties, chloride ions penetration resistance, initial surface absorption

요지

본 연구는 고로슬래그미분말 및 실리카흄과 같은 광물질혼화재를 사용한 시멘트콘크리트 포장의 성능에 대한 역학적, 물리적 평가를 수행하였다. 광물질혼화재 사용 시멘트콘크리트 포장의 휨강도, 압축강도, 통과전하량, 염소이온 확산계수 및 초기표면흡수율을 소정의 재령에서 측정하였으며, 그 결과를 기준 콘크리트 포장의 성능과 비교하였다. 실험결과, 광물질혼화재의 종류에 따라 시멘트 콘크리트 포장의 강도거동은 다르게 나타났으며, 대체적으로 실리카흄을 사용한 콘크리트의 압축강도 발현이 다소 우수하게 나타났다. 뿐만 아니라, 콘크리트의 염소이온 확산계수는 기준 콘크리트에 비하여 매우 작은 경향을 나타냄으로써, 이는 광물질혼화재를 사용한 시멘트콘크리트 포장의 우수한 내염성을 다시 한번 확인 할 수 있었다. 도출된 실험결과를 바탕으로 하여, 향후 고성능 시멘트콘크리트 포장 설계를 위한 재료적 기초 데이터를 제시하고자 한다.

핵심용어

시멘트콘크리트 포장, 광물질혼화재, 역학적 성능, 염소이온 침투저항성, 초기표면흡수율

1. 서론

시멘트콘크리트 포장은 공용연수가 길고 유지관리 및 유지보수가 크게 요구되지 않으며, 중교통량에 적합한 포장으로써 아스팔트 포장과 더불어 대표적인 포장공법으로 사용되고 있다.

특히, 2004년 통계를 살펴보면, 우리나라 전체 고속도로의 58% 이상이 시멘트콘크리트 포장공법으로 시공된 것으로 조사되었다(한국도로공사, 1996).

시멘트콘크리트 포장이 도입된 이후, 포장설계와 관련하여

시행착오를 거치면서 어느 정도 기술축적은 이루어졌으며, 시멘트콘크리트 포장재료의 특성을 고려한 설계 및 시공기술 또한 꾸준한 발전을 거듭해 오고 있다. 그러나, 산업부산물, 즉 광물질혼화재를 활용한 시멘트콘크리트 포장재료에 대한 연구는 국내의 몇몇 연구자들에 의하여 수행되었으나, 콘크리트의 역학적특성 및 내구성 관점에서 보면 이마저도 아직 가시적인 성과를 확보하지 못하고 있는 실정이다.

현재, 우리나라의 경우, 시멘트콘크리트 포장의 설계기술은 지속적인 발전을 거듭하고 있는 반면, 포장재료 및 배합설계에 관련된 기술적 노하우는 선진외국에 비하여 다소 뒤쳐져있는 실정이다. 예를 들면, 미국 텍사스 교통국의 DMS(Department of Materials Specification) 시방서 규정은 우리나라에 비하여 시멘트콘크리트 포장재료로써 광물질혼화재의 활용에 대하여 매우 구체적으로 언급하고 있으며, 관련 기술적 데이터도 많이 확보하고 있다.

주지하다시피, 광물질혼화재(예 : 고로슬래그미분말, 실리카흙, 플라이애쉬, 메타카올린 등)는 콘크리트의 작업성, 장기강도, 수화발열 특성, 내구성 등을 향상시킬 뿐 만 아니라, 일부 재료는 경제적으로 효율성이 높아서 콘크리트용 시멘트 대체재료로써 그 사용량이 점차 증대하고 있다(Hassan et al., 2000; Gonen & Yazicioglu, 2007). 그러나, 시멘트콘크리트 포장재료로 광물질혼화재의 적용성을 검토한 연구결과는 많지 않으며, 그 연구내용도 극히 제한적인 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 광물질혼화재로 고로슬래그미분말 및 실리카흙을 적용한 시멘트콘크리트 포장의 강도특성을 고찰하였으며, ASTM C1202에 준한 촉진 염소이온 통과시험(RCPT : Rapid Chloride Penetration Test) 및 전기화학적 염소이온 촉진시험(migration test)을 수행함으로써 염해환경에서 시멘트콘크리트 포장의 내구성을 실험적으로 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결과를 이용하여 향후 고성능 시멘트콘크리트 포장 설계를 위한 재료적 데이터를 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 실험개요

2.1. 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 KS L 5201에 준하는 보통포틀랜드시멘트이며, 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 다음 표 1과 같다. 또, 혼합시멘트 콘크리트 제조를 위하여 고로슬래그미분말(이하 SG) 및 실리카흙(이하 SF)를 시멘트에 대하여 적절한 비율(SG 35% 및 50%, SF 5% 및 10%)로 대체하여 사용하였으며, 광물질혼화재의 화학성분 및 물리적 성질을 표 1에 나타내었다. 잔골재는 강모래 및 부순모래를 1:1로 혼합하여 사용하였으며, 굵은골재는 부순돌을 사용하였다. 본 실험에 사용된 골재의 물리적 성질은 표 2와 같다. 또, 콘크리트의 적

절한 유동성 및 공기량 확보를 위하여 PC계열 고성능감수제 및 AE제를 사용하였다.

표 1. 시멘트 및 광물질혼화재의 화학성분 및 물리적 성질

Item	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	lg. loss	Density (g/cm ³)	SSA (cm ² /g)
Cement	19.8	4.8	3.1	61.5	2.9	2.8	2.9	3.15	3,480
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

표 2. 골재의 물리적 성질

Item	G _{max} (mm)	Absorption (%)	F.M.	Density (g/cm ³)	remark
River sand	< 5	0.90	2.6	2.56	1 versus 1 mixing of both sands
Crushed sand	< 5	1.14	2.9	2.62	
Crushed gravel	25	0.85	-	2.67	

2.2. 콘크리트 배합

본 실험은 광물질혼화재를 사용하지 않은 기준(plain) 배합과 SG 및 SF를 사용한 4종류 콘크리트 등 총 5배합의 콘크리트를 제조하여 실험을 수행하였으며, 각 콘크리트의 배합특성을 나타낸 것이 표 3이다. 믹싱된 5종류 콘크리트는 제조 1일 후 탈형하여 20±3℃ 수중에서 각각 양생하였다.

표 3. 콘크리트 배합

Symbol	G _{max} (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				W	C	SG	SF	S	G
Plain	25	35	42	150	428	-	-	730	1012
SG-35				150	278	150	-	729	1007
SG-50				150	214	214	-	728	1005
SF-5				150	407	-	21	730	1008
SF-10				150	385	-	43	727	1004

2.3. 실험방법

- (1) 단위용적질량 : 굳지않은 콘크리트의 단위용적질량은 KS F 2409에 준하여 15 l 용기를 사용하여 실험을 수행하였다.
- (2) 휨강도 : 수중에서 표준양생한 10×10×40cm 각주형 공시체를 대상으로 KS F 2408에 준하여 콘크리트의 휨강도를 측정하였다.
- (3) 압축강도 : 수중에서 표준양생한 Ø10×20cm 원주형 공시체를 대상으로 KS F 2405에 의하여 재령 3, 7, 28일에서 압축강도를 측정하였다. 각 재령별로 3개의 콘크리트 공시체의 압축강도를 측정하였으며, 그 평균값을 채택하였다.
- (4) 통과 전하량 : 콘크리트의 통과전하량은 ASTM C 1202에

준하여 두께 50mm의 재령 28일 시험체를 대상으로 하여 측정하였다. 시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 통전시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터 로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였으며(그림 1), 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의 적분값을 취하여 식 (1)에 의하여 총 통과전하량을 산정하였다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서, Q = 총 통과전하량(Coulomb)

I_x = x 분에서의 전류값 (A)

위의 식으로부터 계산된 총 통과전하량을 근거로 표 4에 제시된 범위구간과 비교하여 염소이온 침투저항성을 정성적으로 판단할 수 있다.

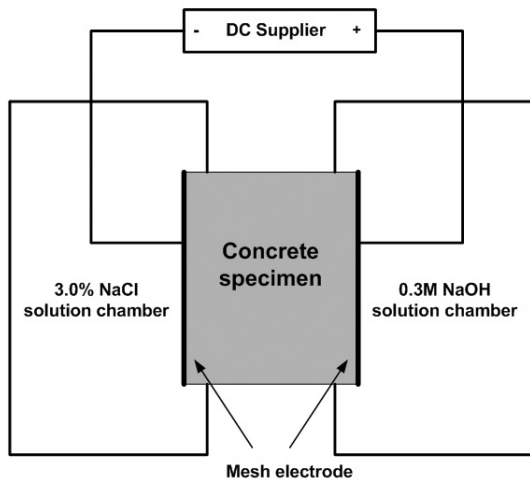


그림 1. ASTM C 1202 확산 셀 구성

표 4. 염소이온 침투성 평가기준

Total passed charge (coulomb)	Chloride ions permeability
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
< 100	Negligible

(5) 염소이온 확산계수 : 콘크리트의 염소이온 확산계수는 전기 화학적 촉진시험법 중 NT BUILD 492법에 의하여 측정하였다. 콘크리트 시편의 두께는 50mm로 하였으며, 음극 셀은 10%의 NaCl 수용액을, 양극 셀은 0.3M의 NaOH 수용액을 사용하였다(그림 2). 확산 셀을 구성한 후 직류 전원 공급장치를 이용하여 30V의 전압을 공급하였으며, 저항에 걸리는 전류와 확산 셀 내부의 온도를 일정 시간동안 측정하였다. 비정상상태의 염소이온 확산계수 (D_{nssm} ; non-steady state migration diffusion

coefficient)는 다음 식(2)로 계산하였다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \quad (2)$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$, $a = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$

D_{nssm} : 비정상상태에서 염소이온 확산계수 (m^2/s), z : 이온의 원자가($z=1$), F : 패러데이 상수, U : 전압차(V), R : 기체상수, T : 용액의 온도(K), L : 시편의 두께(m), x_d : 염소이온의 침투깊이(m), t : 실험기간(s), erf : 오차함수, c_d : 비색법에 의한 반응 농도 및 c_0 : 음극 셀의 염소이온 농도이다.

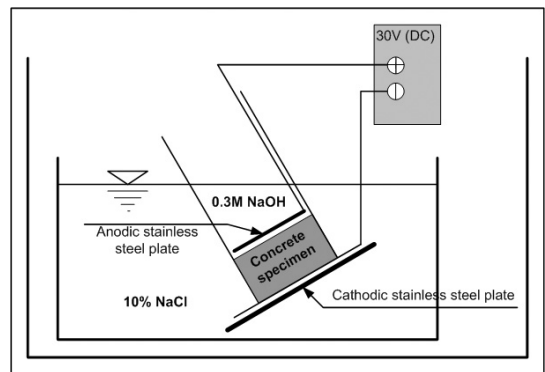


그림 2. 전기화학적 염소이온 촉진시험 장치

(6) 초기표면흡수율 : 콘크리트의 초기표면흡수율(ISA: initial surface absorption)은 BS 1881에 준하여 재령 7일 및 28일 콘크리트 시험체를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시멘트콘크리트 포장의 역학적 특성

군지않은 콘크리트의 단위용적질량은 KS F 2409에 준하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 그림으로부터 시멘트에 비하여 비중이 작은 광물질혼화재(SG 및 SF)를 사용한 콘크리트의 단위용적질량이 기준(plain) 콘크리트에 비하여 다소 작게 나타남을 알 수 있다.

그림 4는 5종류 배합 콘크리트의 재령별 휨강도 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 SG-50 콘크리트를 제외한 4종류 배합의 콘크리트가 재령 3일에서 시멘트콘크리트 포장의 휨강도 기준인 4.5MPa를 상회하는 결과를 나타내었다. 특히, 초기재령에서 기준 콘크리트의 휨강도가 다소 크게 나타났으나, 재령의 증가와 더불어 광물질혼화재를 사용한 혼합 시멘트콘크리트의 휨강도 발현이 매우 향상됨을 확인할 수 있다. 예를 들어 재령 28일에서 기준 콘크리트의 휨강도가 약 7.4MPa로 나타난 반면, 광물질혼화재를 사용한 콘크리트의

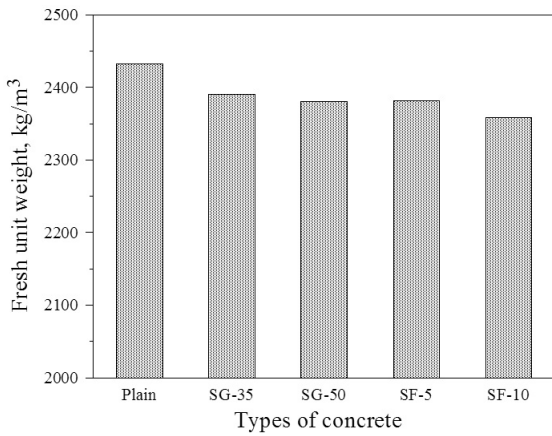


그림 3. 굳지않은 콘크리트의 단위용적질량

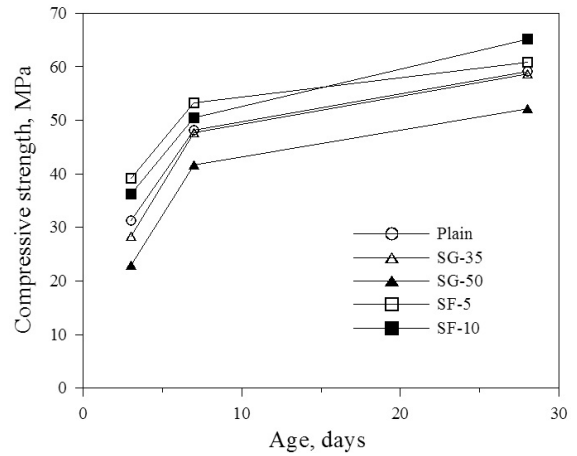


그림 5. 콘크리트의 압축강도

휨강도는 약 8.1~8.6MPa 정도로서 기준 콘크리트에 비하여 다소 높은 값을 나타내었다. 이는 SG 및 SF의 잠재수경성(latent hydraulic property) 및 포졸란반응(pozzolan reaction)에 의한 콘크리트 조직구조의 밀실화 효과에서 기인한 것으로 판단된다(Mehta & Monteiro, 1996).

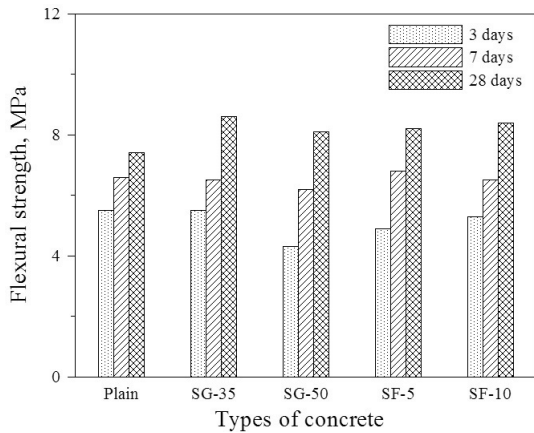


그림 4. 콘크리트의 휨강도

5종류 콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸 것이 그림 5이다. 재령에 관계없이 SF를 혼합한 콘크리트의 압축강도가 다소 크게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 현상이 나타난 이유는 SF콘크리트에 사용된 실리카흙의 micro-filler 작용 및 ITZ(Interfacial Transition Zone)의 개선효과로 사료된다(Goldman and Bentur, 1986; Shannag, 2000).

한편, SG를 35% 대체한 콘크리트(SG-35)는 기준 콘크리트와 유사한 압축강도 발현 경향을 나타내었으나, SG를 50% 대체한 콘크리트는 재령 28일까지 압축강도가 기준 콘크리트에 비하여 다소 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 예를 들어 비교하자면, 재령 28일에서 기준 콘크리트의 압축강도가 약 59.2MPa정도로 나타난 반면, 혼합시멘트콘크리트 배합인 SG-50 및 SF-10 콘크리트의 압축강도는 각각 약 52.1 및 65.2MPa로 나타남으로써, 광물질혼화재 종류에 따른 콘크리트의 압축강도 경향이 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

광물질혼화제가 시멘트콘크리트 포장의 강도특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 혼합시멘트콘크리트의 강도를 기준 콘크리트의 강도에 대한 비로써 나타낸 것이 표 5이다. 이 표에서 나타났듯이 광물질혼화제를 대체한 콘크리트의 휨강도비는 초기재령에서 강도발현이 작게 나타난 반면, 재령 28일에서는 기준 콘크리트에 비하여 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 반면, 콘크리트의 압축강도비의 경우, SG 대체 콘크리트에 비하여 SF 대체 콘크리트의 강도발현이 재령에 관계없이 우수하게 나타남을 확인하였다.

표 5. 시멘트콘크리트 포장의 휨 및 압축강도비

	Flexural strength ratio(%)			Compressive strength ratio(%)		
	Curing times			Curing times		
	3d.	7d.	28d.	3d.	7d.	28d.
Plain	100	100	100	100	100	100
SG-35	100	98	116	91	99	99
SG-50	78	94	109	73	86	88
SF-5	89	103	111	125	110	103
SF-10	96	98	114	116	105	110

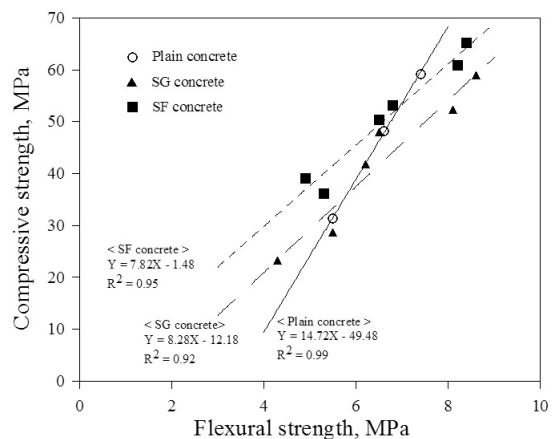


그림 6. 콘크리트의 휨강도와 압축강도의 관계

본 연구에서 고찰된 5종류 시멘트콘크리트 포장의 휨강도와 압축강도의 상관관계를 나타낸 것이 그림 6이다. 각 콘크리트의 휨강도 및 압축강도는 선형적인 관계를 나타내었으며, 배합의 종류에 관계없이 콘크리트의 휨강도 및 압축강도는 Bhanja & Sengupta(2005)의 연구와 마찬가지로 식 (3)와 같은 지수함수의 관계($R^2=0.82$)를 나타냄을 알 수 있다.

$$f_c = 3.734(f_f)^{1.328} \text{ MPa} \quad (3)$$

여기서, f_c = 콘크리트의 압축강도(MPa)
 f_f = 콘크리트의 휨강도(MPa)이다.

3.2. 시멘트콘크리트 포장의 염소이온 침투저항성

시멘트콘크리트 포장이 해양환경 콘크리트포장, 해상교량, 저울철 제설제 살포 등의 요인에 의하여 외부로부터 염소이온이 침투하는 환경에 노출될 경우, 콘크리트는 철근부식의 위험에 직면하게 된다. 따라서, 시멘트콘크리트 포장의 내구성능을 확보하기 위해서는 외부 염소이온의 침투에 대한 저항성이 우수한 재료 및 배합의 선정이 무엇보다도 중요하다(Mohr et al., 2000; Wang et al. 2006).

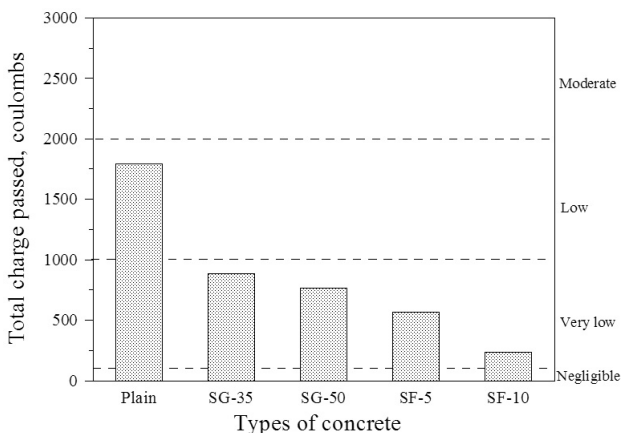


그림 7. 콘크리트의 총 통과전하량 (재령 28일)

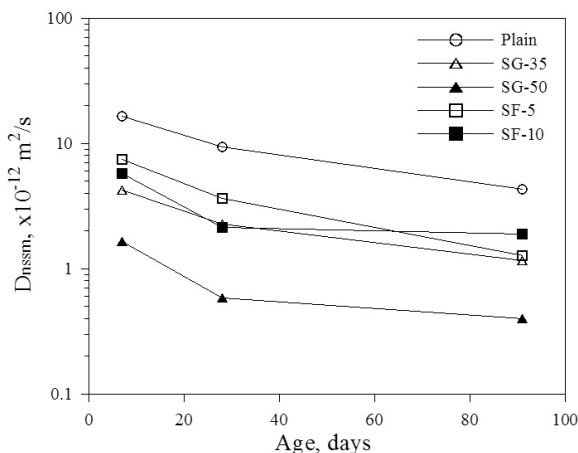


그림 8. 콘크리트의 염소이온 확산계수

그림 7은 ASTM C 1202 실험법에 준하여 측정된 재령 28일 콘크리트의 통과전하량을 나타낸 것이다. 콘크리트의 총통과전하량은 콘크리트 배합에 따라 상이하게 나타났으며, 광물질혼화재를 대체한 콘크리트의 총 통과전하량이 기준 콘크리트에 비하여 상대적으로 작은 총 통과전하량 값을 나타내었다. 다시 말해서, 광물질혼화재(SG 및 SF)를 사용하지 않은 기준 콘크리트가 표 4에서 제시한 염소이온 침투성 평가기준 'Low' 영역의 값인 1793coulomb을 나타낸 반면, SG-35, SG-50, SF-5 및 SF-10 콘크리트는 'Very low' 영역에 해당하는 235~886coulomb의 값을 나타내었다.

한편, NT BUILD 492법에 의한 콘크리트의 확산계수(D_{nssm})를 재령별로 측정하여 나타낸 것이 그림 8이다. 콘크리트의 확산계수는 재령의 증가와 더불어 감소하는 경향을 나타내었으며, 기준 콘크리트의 확산계수가 광물질혼화재 사용 콘크리트에 비하여 재령에 관계없이 큰 값을 나타내었다. 특히, SG-50 콘크리트의 확산계수는 기준 콘크리트에 비하여 약 1 order 이상 작은 확산계수 값을 나타냄으로써 염소이온의 침투 저항성이 가장 우수하게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 그림 5에서 제시된 콘크리트의 압축강도 결과와는 다소 상이하게 나타나므로써, 콘크리트의 염해 저항성은 콘크리트의 화학성분 및 투과성과 밀접한 관련이 있는 반면, 콘크리트의 압축강도와는 반드시 일치하는 결과가 나타나지 않음을 알 수 있다(Haque & Al-Khaiat, 1999). 한편, 재령 91일에서 콘크리트의 염소이온 침투저항성은 plain<SF-10≤SG-35≤SF-5<SG-50 순으로 나타남으로써, 광물질혼화재를 사용한 콘크리트가 염해환경에 사용될 경우, 내구성 관점에서 시멘트콘크리트 포장의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

그림 9 및 10은 콘크리트의 염소이온 확산계수와 강도특성과의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 전술하였다시피, 콘크리트의 강도특성과 확산특성은 반드시 선형적인 관계로 거동하지 않음을 알 수 있다. 특히, 이와 같은 경향은 콘크리트의 휨강도와 확산계수와의 관계에서 더욱 뚜렷이 관찰되었다(그림 9).

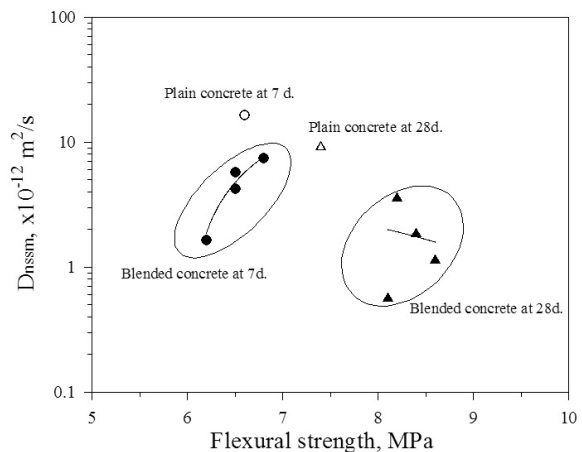


그림 9. D_{nssm} vs 휨강도

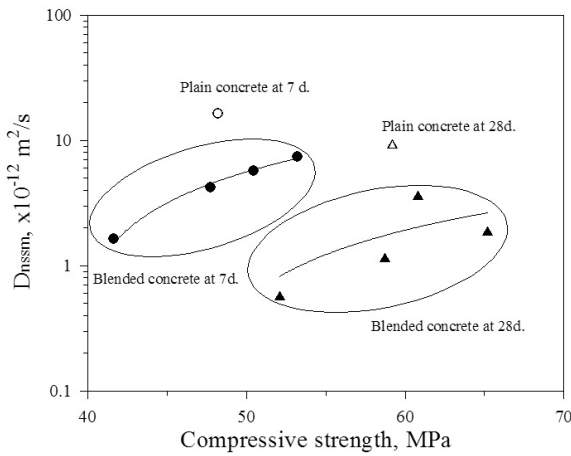
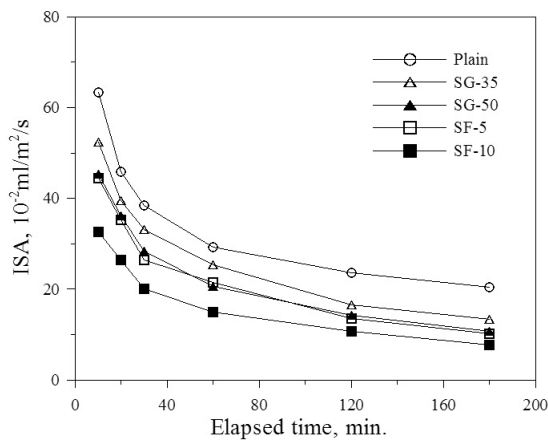


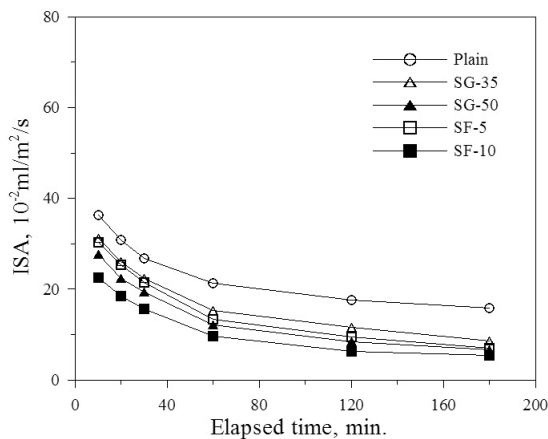
그림 10. D_{nssm} vs 압축강도

3.3. 시멘트콘크리트 포장의 초기표면흡수율

콘크리트의 공극분포 및 크기는 수화물량, 물-결합재비, 양생조건, 광물질혼화제의 종류와 같은 다양한 변수에 따라 영향을 받으며 시간 함수에 의해 좌우된다. 또한, 콘크리트의 공극 특성은 콘크리트의 투수성에 결정적인 영향을 미치게 된다 (Zain et al., 2000).



(a) 7 days



(b) 28days

그림 11. 콘크리트의 재령별 초기표면흡수율

본 연구에서는 시멘트콘크리트 포장의 투수특성을 정성적으로 평가하기 위하여 흡수율실험을 수행하였으며, 평가 Index로써 채택한 초기표면흡수율 (ISA: Initial Surface Absorption)을 측정하여 콘크리트 배합별로 재령 7일 및 28일에서 비교하여 그림 11과 같이 나타내었다. 측정결과, 콘크리트의 ISA는 재령의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내었으며, ISA값에 대한 광물질혼화제의 유효성을 확인할 수 있었다. 또, 콘크리트의 강도특성 및 염소이온 침투저항성 결과에서도 관찰되었듯이 기준 콘크리트의 ISA 값이 재령에 관계없이 비교적 크게 나타나는 경향을 보였다.

4. 결론

본 연구는 시멘트콘크리트 포장의 성능향상을 위한 광물질혼화제의 적용성을 평가하기 위하여 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시멘트콘크리트 포장의 강도특성을 고찰한 결과, 광물질혼화제의 종류에 따라 휨 및 압축강도 거동이 다르게 나타났으며, 대체적으로 실리카흄을 사용한 콘크리트의 압축강도 발현이 우수하게 나타났다. 한편, 본 연구에서 분석된 콘크리트의 휨강도 및 압축강도는 $f_c = 3.734(f_f)^{1.328}$ 의 지수함수 관계를 나타내었다.
2. SG 및 SF 사용 콘크리트의 염소이온 확산계수가 기준 콘크리트에 비하여 상대적으로 작은 결과값을 나타내었으며, 이는 염해환경하에서 광물질혼화제를 사용한 콘크리트 포장을 사용함으로써, 콘크리트 포장 공용수명을 연장 시킬 수 있으리라 사료된다.
3. 콘크리트의 ISA값은 배합에 관계없이 재령의 증가와 함께 감소하였으며, 광물질혼화제 사용 콘크리트의 ISA값이 기준 콘크리트에 비하여 상대적으로 작게 나타났다. 따라서, 광물질혼화제의 적절한 대체는 시멘트콘크리트 포장의 표면 효과를 효과적으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

한국도로공사, "조기교통개방 콘크리트 포장공법에 대한 실험적 연구", 1996년 실용화 연구보고서.

Bhanja, S. and Sengupta, B.(2005), "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 4, pp. 743-747.

Goldman, A. and Bentur, A.(1989), "Bond effects in high strength silica fume concretes", ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 4, pp. 440-447.

Gonen, T. and Yazicioglu, S.(2007), "The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete", Building and Environment, Vol. 42, No. 8, pp. 3080-3085

- Haque, M.N. and Al-Khaiat, H.(1999), "Durable concrete structures in a chloride-sulfate rich environment", Concrete International, September, pp. 49-52.
- Hassan, K.E., Cabrera, J.G. and Maliehe, R.S.(2000), "The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete", Cement and Concrete Composites, Vol. 22, No. 4, pp. 267-271.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M.(2006), "Concrete-Microstructure, Properties and Materials", 3rd edition, McGraw-Hill, USA, pp. 305.
- Mohr, P., Hansen, W., Jensen, E. and Pane, I.(2000), "Transport properties of concrete pavements with excellent long-term in-service performance", Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 12, pp. 1903-1910.
- Shannag, M.J.(2000), "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume", Cement and Concrete Composites, Vol. 22, No. 6, pp. 399-406.
- Wang, K., Nelsen, D.E. and Nixon, W.A.(2006), "Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials", Cement and Concrete Composites, Vol. 28, No. 2, pp. 173-188.
- Zain, M.F.M., Safiuddin, Md. and Mahmud, H.(2000), "Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios", Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 9, pp. 1501-1505.

접 수 일 : 2010. 6. 14

심 사 일 : 2010. 6. 28

심사완료일 : 2010. 8. 23