

제설제에 의한 콘크리트 표면 열화 대책에 관한 검토

정 해 문*, 이 병 덕, 박 성 기

한국도로공사 도로교통기술원 재료·환경연구그룹

1. 서 론

적설한랭지역의 동절기 교통안전을 위해 제설제 살포가 다량으로 이루어지고 있고, 살포량도 매년 증가하고 있는 실정이다. 일반적으로 사용되는 제설제는 염화칼슘(CaCl_2), 염화나트륨(NaCl)과 같은 염화물계가 주성분으로, 국내에서는 대부분 염화칼슘을 주로 사용하고 있다. 이와 같은 제설제는 염화물을 함유하고 있어 살포시 도로 구조물로 침투하여 염해에 의한 철근부식으로 구조적 성능저하를 야기하기도 하지만, 동절기 동해와 함께 복합적으로 작용하여 표면 스케일링 발생 등 콘크리트 표면이 열화되는 형태로 나타나 외관상 문제가 되고, 열화를 더욱 가속시키기도 한다. 특히 보수후 재열화 빈도가 높아 건설시부터 근본적인 대책을 세워 설계, 시공할 필요가 있다.

당사에서 관리하는 고속도로 구조물 중, 제설제의 살포량이 많은 지역의 콘크리트 배수구조물(다이크, L형측구)과 중앙분리대, 방호벽과 같이 제설제와 직접 접촉하는 구조물에서 제설제에 의한 표면 열화 형태의 손상이 많이 관찰되어, 이에 대한 원인분석 및 개선방안을 검토하고자, 표면열화에 대한 대책을 선정해 영동고속도로 횡계~강릉간 구간에 2001년 6월에서 10월 사이에 걸쳐 시험시공을 시행하였고, 추적조사를 하여 시험시공 효과를 검토하였다.

2. 제설제에 의한 콘크리트 표면 열화 발생 메카니즘

제설제에 의한 콘크리트 표면열화 발생 메카니즘은 본질적으로 물리적인 작용으로, 동해의 발생 메카니즘인 Power^1 의 침투압설의 확대 해석이 기본이 되고, 그 외에도 각종 메카니즘이 제안되고 있지만, 아직도 정확하게 파악되고 있지 못한 실정이다. 이는 실험실적 조건과 현장 조건과의 차이가 크고, 콘크리트 표면 스케일링 현상이 매우 복잡하고 콘크리트의 미세적인 레벨에서의 비균질성에서 기인하기 때문에 각각의 현상에 대한 명확한 설명이 아직 불가능한 실정이다. 여기에서는 Marchand²⁾와 Pigeon³⁾ 등이 정리한 주요 메카니즘을 미시적(microstructure)인 요인, 거시적(macrostructure)인 요인으로 구분해서 설명하기로 한다.

미시적인 요인으로는 ① 침투압의 증가 및 수압과의 복합 현상, ② 콘크리트 포화도의 증가 및 증기압차에 의한 수분이동, ③ 염의 결정 성장 등으로 설명하고, 거시적인 요인으로는 ① 열충격 발생, ② 충전 동결에 의한 용력차 발생 등에 의한다고 설명하고 있다.

이들 여러 학설들 중에서 주요 학설을 설명해 보면, 침투압설의 경우, 얼음의 형성은 보다 큰 세공종의 용액으로부터 시작되지만, 염화물이 존재하면 동결온도가 저하되는 과냉각 현상을 일으키므로, 물이 모두 얼지 않아, 순수한 얼음이 석출되고 남은 용액의 염분농도가 높아져 보다 작은 세공의 용액(원래 농도)과의 사이에 농도차가 발생한다. 화학적 포텐셜의 차로 인해 보다 작은 세

공속의 물을 용액의 염농도가 보다 높은 큰 세공으로 이동시키는 침투압이 발생해 내부응력을 발생시킨다. 보다 큰 세공중의 물은 빠져 나온 물에 의해 염농도가 감소하므로 많은 얼음이 형성된다. 또 온도의 저하는 작은 세공중의 용액 혹은 염농도가 어느 정도 높게 된 용액에 의해 얼음의 형성을 가능케 하므로 내부응력을 증대시켜 이 응력발생에 의해 콘크리트 조직이 파괴된다는 것이다.

한편, 거시적인 요인의 열충격 발생설은 보다 쉽게 이해할 수 있는데, 제설제가 살포되면 콘크리트 표층의 온도가 매우 급속하게 변화되어 열충격이 생긴다는 설이다. 즉, 염화나트륨은 물에 녹을 때 흡열반응을 수반하므로, 콘크리트로부터 열을 흡수하기 때문에 콘크리트 표면의 온도는 급속하게 저하되고, 염화칼슘은 발열반응을 수반하므로 콘크리트 표면의 온도가 급속하게 상승하여, 표층의 급속한 온도변화에 의해 발생된 응력이 콘크리트의 인장강도를 상회하면 미세한 균열이 발생될 가능성이 있다는 것이다. 그림 1에 제설제 살포후 콘크리트의 단면내의 온도변화를 나타낸 그림이다⁴⁾.

이러한 여러 학설중에 어느 한가지의 주장이 타당하다고 명확하게 설명되어지지는 못하고 있는 실정으로, 앞서 설명한 요인들이 복합적으로 작용해 표면열화 현상을 일으킨다고 생각되고 있다. 이와 함께 콘크리트 표면은 내부의 본체와 달리, 페이스트량이 많고, 블리딩에 의해 물/시멘트비가 높아 수축에 의한 미세균열이 발생하기 쉬우며, 또 대기와 접촉해 있으므로 건조되기 쉬워 모세관 공극의 구조가 변화되어 동결가능 수량이 증가될 수 있어, 이러한 간접적인 요인들로 인해 더욱 열화가 현저하게 나타난다고 생각되어지고 있다.

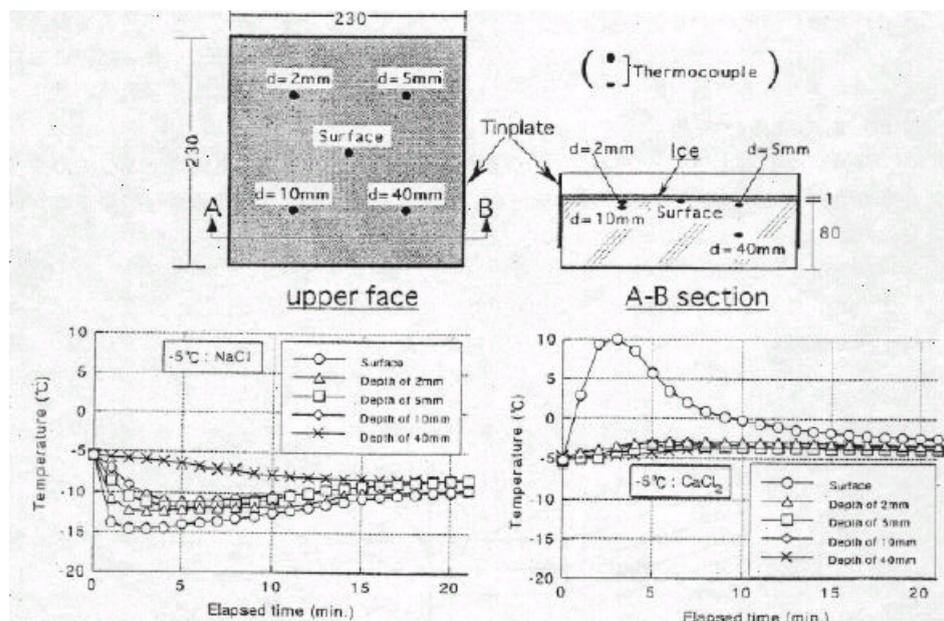


그림 1 NaCl과 CaCl₂ 살포후 콘크리트 단면내의 온도변화⁴⁾

3. 표면열화 방지를 위한 대책

제설제에 의한 표면 열화 방지를 위해서는 재료, 시공 등 측면에서 여러 가지 방안을 고려할 수 있는데, 재료측면에서는 동해에 대한 내구성을 갖고, 제설제의 침투자체를 억제하며, 표면에서 제설제의 용해에 의한 온도변화에 견딜 수 있는 방안이 기본이 된다고 할 수 있다. 즉 콘크리트 자

체의 조직이 치밀하고 역학적인 특성이 우수하며, 동해 우려를 위해 충분한 공기량을 확보해 주는 것이 필요하다.

본 연구에서는 이와 같은 방안을 기본으로 시공성과 경제성을 고려하여 다음과 같은 대책을 선정하였고, 표 1에 대책안에 대한 설명을 정리하여 나타내었다.

3.1 제1안 : 배합비 개선(강도상향 조정)

현재 가장 표면열화가 현저한 콘크리트 배수구조물은 설계기준강도가 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 이므로, 설계기준강도를 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 고강도로 배합하여 치밀한 조직을 부여하고 역학적 저항성을 증가시키고자 하였다. 배합은 물/시멘트비를 45% 이하가 되게 하고, 동해방지를 위해 공기량을 5~7%로 하여 콘크리트를 제조하였다.

3.2 제2안 : 광물성 혼화재료(고로슬래그) 혼합

보다 치밀한 콘크리트 조직을 부여하기 위하여 슬래그 미분말을 사용하는 배합으로, 기존의 결합계량을 증가시키지 않고, 결합계량에서 50%를 슬래그를 첨가하여 시멘트 치환하는 것으로 하고, 공기량도 5~7%로 하여 콘크리트를 제조하였다.

3.3 제3안 : 침투식 방수제 도포

수분 및 제설제의 침투를 억제하고자 간편한 시공법인 침투식 방수제를 도포하는 것으로 하였다. 기존의 설계기준강도 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 콘크리트에 발수제 계열의 침투식 방수제를 도포하였다.

표 1 본 연구에서 선정한 대책에 대한 설명

구 분	제 1 안	제 2 안	제 3 안
제 목	배합비 개선(고강도배합)	고로슬래그 혼합	침투식 방수제 도포
목 적	- W/C 저하시켜 투과성 감소 - 역학적 특성 향상	- 슬래그 첨가로 투과성 감소	- 방수제를 도포하여 투과성 감소
내 용	- 물시멘트비 45%이하 - 현장타설직전 공기량 5~7% 유지 - $\sigma_{28} = 400 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 이상	- 분말도가 높은 고로 슬래그 미분말 사용 - 결합계량의 50% 사용 - 현장타설직전 공기량 5~7% 유지	- 콘크리트 표면에 침투식 발수제 계열의 방수제를 도포 - 현장타설직전 공기량 5~7% 유지

4. 시험시공

앞서 제안한 3가지 안으로, 영동고속도로 원주~강릉간 4차로 확장공사 제12, 제14공구의 3개 현장(시공회사 : 현대건설(주), 대림산업(주), 벽산건설(주))에 대해 다이크와 측구 구조물을 대상으로 시험시공을 실시하였다. 시험시공을 실시한 구간은 신갈기점 172~180km의 구간으로, 시험시공 연장은 각 공구 현장의 각 안에 대해 85m ~ 200m 정도였으며, 일시는 2001년 6월 12일 ~ 10월 6일에 실시하였다. 표 2에 시험시공 배합표를 나타내었다.

콘크리트 타설은 슬립폼페이퍼(Commander3, SP-250) 장비에 의한 기계식으로 실시하였다. 표 3에 제형별 압축강도를 나타내었는데, 제1안인 고강도 배합의 경우 28일 압축강도는 평균 433kg/cm² (410~473kg/cm²), 제2안인 슬래그 미분말 첨가한 경우 평균 265kg/cm² (232~320kg/cm²), 제3안인 방수제 도포한 경우 평균 263kg/cm² (244~279kg/cm²) 정도를 나타내었다.

표 2 시험시공 각공구별 콘크리트 배합표

구분	공종	설계 기준 강도 (kg/cm ²)	굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m ³)								
								W	C	Slag	S	G	AE 감수제	고성능 AE 감수제	유동 화제	
현대 구간	다이크	1안	400	19	3.5	6.1	44	48.7	150	341	-	863	923	1.023	2.046	-
		2안	210	19	3	4.5	50	45.2	167	166	166	828	1008	0.5	-	-
		3안		19	4	5.5	55	46.4	168	305	-	833	977	0.915	-	-
대림 구간	다이크	1안	400	19	3	4.5	36	47	161	447	-	796	924	6.258	-	4.470
		2안	210	19	3	4.5	50	45.2	167	166	166	828	1008	0.5	-	-
		3안		19	4	4.5	52	49	166	319	-	894	959	0.479	-	-
벽산 구간	L형 측구	1안	400	19	3.5	6.1	44	48.7	150	341	-	863	923	1.023	2.046	-
		2안	210	19	3	4.5	50	45.2	167	166	166	828	1008	0.5	-	-
		3안		19	4	5.5	55	46.4	168	305	-	833	977	0.915	-	-

표 3 시험시공 각공구별 콘크리트 압축강도

구	분	7일 압축강도(kg/cm ²)	28일 압축강도(kg/cm ²)	비고
현대건설(주)	제1안	326	410	
	제2안	246	320	
	제3안	216	279	
대림산업(주)	제1안	396	473	
	제2안	196	244	
	제3안	205	248	
벽산건설(주)	제1안	323	415	
	제2안	181	232	
	제3안	197	262	

5. 시험시공 추적조사 결과 및 고찰

5.1 현장 환경

현장은 영동고속도로 대관령 구간(대관령 지사 관할)으로 1995년부터 기상통계를 조사한 결과, 연평균 강설일수가 49일, 연평균 적설일수가 107일, 최심적설은 188.8cm, 동절기의 일평균기온이 -5.2℃, 최저기온은 -25℃를 나타내는 곳이다. 대관령지사의 연간 제설제 살포량을 강설량에 따라 연도별로 차이가 나지만, 1995년부터 평균이 25kg포대로 23,000포(575톤) 정도를 평균적으로 살포하고 있으며, 이는 경부고속도로 지사당 평균살포량의 약 2.3배에 달하는 양이다.

5.2 추적조사 및 분석방법

시험시공 후 동절기를 1회 지난 시점에서 추적조사를 실시하였다. 시험시공 후 217~340일 정도 경과한 상태였다. 조사항목 및 방법을 표 4에 정리하여 나타내었다. 각 시험시공 실시 구간을 전체에 걸쳐 육안관찰에 의한 외관 검사를 행하여, 표면 열화상태를 검사하였고, 압축강도는 슈미트 햄머를 이용하여 측정하였다. 또, 대표적이라고 생각되는 부위에 대하여 코어 시험체를 채취해 각각 중성화 깊이, 깊이별 염화물 침투량, 방수제 침투깊이 등을 조사하였다.

표 4 시험시공 추적조사 시험방법

조사 항목	시험 방법	비 고
외관 조사	· 육안관찰에 의한 표면상태, 박리/박락여부 관찰	
압축강도	· 슈미트 햄머 이용	
중성화 깊이	· 코어 시편 채취 · 할열면에 페놀프탈레인 용액 분무	
염화물 침투량	· 코어 시편 이용 · 표면으로부터 1cm 간격으로 절단하여 염화물 함량 측정	
방수제 침투깊이	· 코어 시편 이용 · 할열면에 물을 분무하여 발수경계 확인	

5.3 조사결과 및 고찰

(1) 콘크리트 표면상태 외관 조사

그림 2에 시험시공 미실시 구간과 실시구간에 대한 표면상태를 나타내었다. 시험시공을 실시하지 않았던 기존방식에 의해 시공된 구간은 전형적인 제설제에 의한 표면 스케일링 현상이 나타났는데 반해, 시험시공 실시 구간에 있어서는 표면 스케일링 현상이 나타나지 않은 것을 볼 수 있다. 따라서 고강도 콘크리트 사용, 슬래그 미분말 첨가, 방수제 도포 등의 방법은 기존 콘크리트에 비해 제설제에 의한 표면열화현상에 대한 억제 효과가 있는 것으로 나타났으나, 각 안에 대한 상대적인 비교는 외관상 열화가 아직 진행되지 않아, 추적조사 시점에서는 판단하기 곤란하였다. 외부 노출 시험기간이 열화가 나타나기에는 비교적 단기간이었으므로, 더 장기간의 추적조사를 행할 필요가 있다고 보여진다.



(a) 시험시공 미 실시 구간



(b) 배합개선(고강도콘크리트) 적용구간



(c) 슬래그 첨가 적용구간



(d) 킴투식 방수제 적용구간

그림 2 콘크리트 표면상태 외관 조사 결과 사진

(2) 압축강도 측정 결과

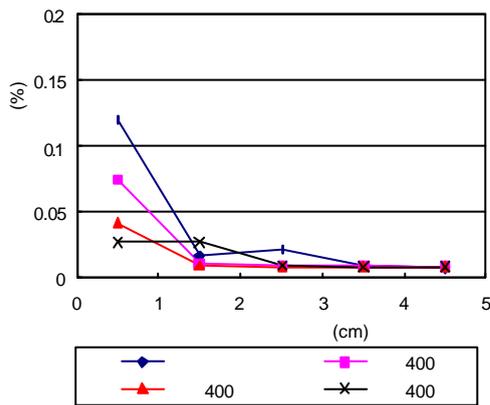
슈미트 햄머에 의한 압축강도 추정 결과를 표 5에 나타내었다. 슈미트 햄머에 의한 추정 압축강도는 실측 압축강도와 다소 차이를 보일 수 있는데, 전체적으로 보았을 때 시험시공 당시에 비해 큰 변화는 없는 것으로 보인다. 슈미트 햄머 측정 결과는 콘크리트 표면상태에 큰 영향을 받으므로 외관 조사 결과와 마찬가지로 표면 열화가 아직 진행되지 않고 있다고 생각된다.

(3) 깊이별 염화물 함량 측정 결과

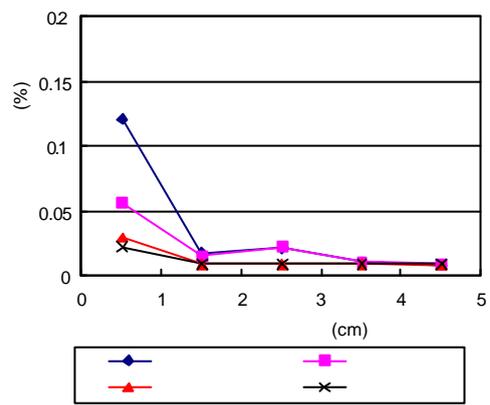
그림 3은 깊이별 염화물 함량 측정결과를 나타낸 그림이다. 각 시공구간별로 약간의 차이를 보이고 있지만, 표면부위(0~1cm)의 염화물량이 미시공 부위에 비해 작게 나타나, 제설제에 의한 염화물 침투 억제 효과가 있는 것으로 나타났고, 전체적으로 표면에서 1cm 이후로는 염화물 침투가 거의 없는 것으로 나타나 염화물 확산에 의한 침투는 거의 나타나지 않은 것으로 나타났다. 앞서 외관 조사에서와 마찬가지로 1, 2, 3안 각안에 대한 상대적인 비교는 추적조사 시점에서 판단하기 힘든 결과를 나타내고 있다.

표 5 슈미트햄머에 의한 압축강도 측정결과

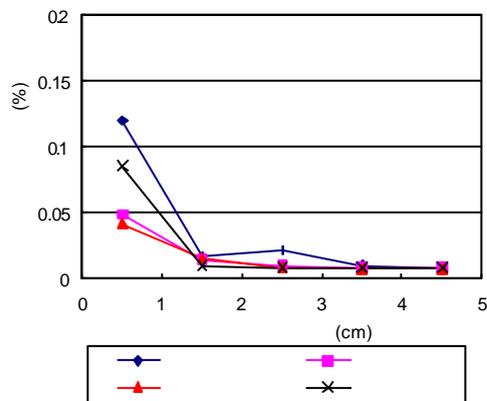
구	분	슈미트 햄머에 의한 추정 압축강도 (kg/cm ²)	비 고	
			시험시공 당시 실측 압축강도	시험시공 당시 슈미트햄머에 의한 추정압축강도
현대건설	제1안	362	410	467
	제2안	349	320	376
	제3안	375	279	350
대림산업	제1안	323	473	407
	제2안	323	244	345
	제3안	375	248	330
벽산건설	제1안	291	415	443
	제2안	284	232	344
	제3안	271	262	281
미적용		245	-	-



(a) 배합개선(고강도콘크리트)적용구간



(b) 슬래그 첨가 적용구간



(c) 침투식 방수제 적용구간

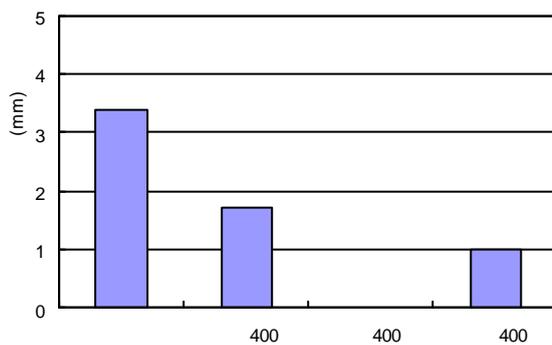
그림 3 깊이별 염화물 함량 측정결과

(4) 중성화 깊이

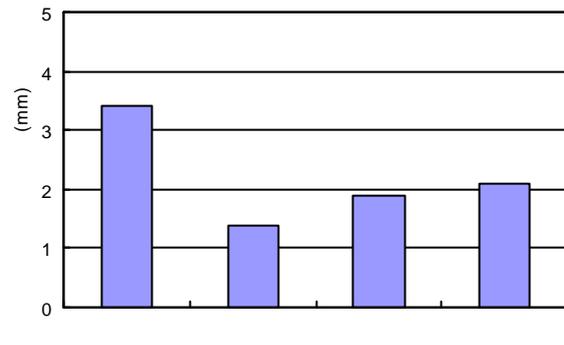
그림 4에 중성화 깊이 측정결과를 나타내었다. 기존 방식에 의한 시험시공 미적용 구간의 경우에 비해 시험시공 구간이 중성화 깊이가 절반이하로서 중성화에 대한 억제 효과가 있는 것으로 나타났다. 다만, 각시험 시공일자가 모두 달라, 대기에 노출된 기간이 다소 차이가 나므로, 각안과 시공사간의 부위에 대한 비교는 힘든 것으로 보인다. 각안에서 시공사 부위에 따른 차이는 노출기간 차이때문으로 보인다. 침투식 방수제를 도포한 경우, 방수제의 영향으로 중성화 깊이를 정확하게 판단하기 곤란하였다.

(5) 방수제 침투깊이

방수제 침투깊이를 확인해 본 결과, 현대와 대림 시공의 경우, 2.4, 4.8mm 정도가 침투해 있는 것으로 나왔으나, 벽산 시공부위의 경우, 침투해 있지 않은 것으로 나타났다. 국부적인 결과이기는 하지만, 이러한 미침투 결과로 인해, 앞서 깊이별 염화물 침투결과에서 방수제 적용구간의 벽산시공부위의 표층부 염화물량이 다소 높게 나타난 것으로 보인다. 본 시험시공에 사용한 침투식 방수제의 경우, 2~4mm 정도 침투하는 것으로 설계되어 있어, 적정깊이만큼 침투했다고 판단되나, 일부 침투되지 않은 결과도 나타나, 침투식 방수제를 시공할 경우, 철저한 시공관리에 의해 침투량 및 침투깊이를 확보해야 할 필요가 있을 것으로 보인다.



(a) 배합개선(고강도콘크리트)적용구간



(b) 슬래그 첨가 적용구간

그림 4 중성화 침투 깊이 측정 결과

표 6 방수제 침투깊이 측정결과

시험시공구분	업체	코아채취 위치	방수제 침투 깊이(mm)	비고
침투식방수제 도포	현대	다이크	3.8	
	대림		2.4	
	벽산(측면)	L측구	0	
	벽산(밀면)		0	

6. 결론

(1) 적설한랭 구간인 영동고속도로 횡계~강릉 구간에 배합개선(고강도), 슬래그 미분말 첨가, 방수

제 도포의 3개의 안으로 시험시공을 하여 추적조사를 행한 결과, 외관상 시험시공을 적용하지 않은 구간에서는 표면박리, 박락 현상이 발생하였으나, 시험시공구간은 모두 육안관찰상 열화는 관찰되지 않아 제설제에 의한 표면열화에 대한 억제효과가 있는 것으로 나타났다.

(2) 깊이별 염화물 침투함량을 분석해 본 결과, 시험시공 미적용 부위에 비해 염화물 침투량 및 침투깊이가 작은 것으로 나타나, 제설제 침투 억제에 대한 효과가 있는 것으로 판단되었고, 중성화 측정 결과, 시험시공 미적용 부위에 비해 중성화가 덜 진행된 것으로 나타나, 중성화 저지 효과도 있는 것으로 나타났다.

(3) 결과를 종합하여 보았을 때, 본 시험적용에서 적용한 세가지 안은 현상황에서 제설제에 의한 동해 피해에 효과가 있는 것으로 나타났다. 다만, 각 안에 대한 변별력이 아직 나타나지 않은 상태로 지속적인 추적조사를 통해 적정 시공 방법을 도출할 필요가 있다고 보여진다.

(4) 방수제 침투깊이를 확인해 본 결과, 침투해 있지 않은 부위도 있는 것으로 나타나, 침투식 방수제를 시공할 경우, 철저한 시공 관리에 의해 침투량 및 침투깊이를 확보해야 할 필요가 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- 1) T.C.Powers and R.H.Helmuth, "Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste during Freezing", Highway Research Board, No.32, pp.285-297, 1953.
- 2) E.J.Marchand and M.Pigeon, "The Deicer Salt Scaling Deterioration of Concrete, A Overview", ACI SP-145, pp.46, 1994.
- 3) M.Pigeon and R.Pleau, Modern Concrete Technology 4, Durability of Concrete in Cold Climate, Chapter 2, Theories of Frost Action and Deicer Salt Scaling Mechanism, pp.11-30, E^FN SPON, 1995.
- 4) 村国誠 外, 塩化物の路面凍結防止効果に関する試験研究, 第9回日本雪工学会論文報告集, pp.191-198, 1992.