

고속도로 콘크리트 노출 바닥판에서의 제설 염화물의 침투 특성

Penetration of De-icing Salt in Bare Concrete Bridge Decks on Highways

서진원* 이지영** 구본성*
Suh, Jin Won Rhee, Ji Young Ku, Bon Sung

ABSTRACT

The major cause of deterioration for the bare concrete bridge decks exposed to de-icing chemicals would be chloride-induced reinforcement corrosion. Thus, in this paper, in order to predict time to corrode for concrete bridge decks on highways, the chloride concentration was measured with depth from the surface. Then, the surface chloride concentration and apparent diffusion coefficient were calculated by regression. The premature failure of bare concrete decks were mostly related with thin cover depth and poor concrete property (high permeability). The good protection of deck surface might contribute to the prolongation of the service life of bare concrete bridge decks.

1. 서론

'80년대에 건설된 88 고속도로, 호남고속도로 확장, 제1 중부고속도로에서는 도로포장이 콘크리트 포장으로 대체되면서 교면포장도 아스팔트를 사용하지 않고 마모층 개념을 도입하여 콘크리트 피복두께를 4cm 정도 크게 설계하여 콘크리트 노출 바닥판으로 시공하였다. 그러나 이러한 콘크리트 노출 공법의 도입시에 충분한 사전 검토없이 적용되어 일부 교량 바닥판의 상면에 철근 부식 및 콘크리트 박락 등과 같은 손상이 발생되었으며, 이러한 손상이 부각되어 '90년대에 건설된 교량에 교면포장을 다시 실시하고 있다. 그러나, 콘크리트 노출 바닥판의 약 20년간의 공용 후에 상태를 평가한 결과, 콘크리트의 품질과 피복두께가 확보된 경우에 양호한 상태를 유지하고 있어 특별한 유지관리비가 소요되지 않고 공용중이며 이러한 이유로 시공성, 유지관리 그리고 구조적인 관점에서 기존 콘크리트 노출 바닥판에 대한 공용성에 대한 재평가가 이루어지고 있다. 이러한 일환으로 콘크리트 노출 바닥판의 주요 손상원인 중의 하나인 철근 부식에 의한 박락을 유발시키는 제설 염화물에 침투 특성을 파악하고 바닥판의 수명을 평가하고자 고속도로상에 공용중인 콘크리트 노출 바닥판에서 코어를 채취하여 깊이별 염화물을 측정하여 표면 염화물량 및 겉보기 확산계수를 구하였다.

2. 공용 중인 콘크리트 노출 바닥판의 염화물 침투 측정

콘크리트 노출 바닥판 교량에 대한 기존의 현장 점검 자료 및 육안조사결과를 근거로 하여 각 노선별 또는 지사별로 1~2 개소씩의 교량을 선정하여 코어를 채취하여, 10mm 단위별로 깊이에 따른 염소이온량을 측정하여 표 1에 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 동일 노선상에 있는 교량의 경우에도 침투 염소이온량이 매우 다양하게 나타나고 있다. 바닥판의 상태가 양호한 교량의 경우에는 염소이온의 침투량이 매우 작게 나타나고 있으나, 부분적으로 손상이 발생한 교량의 경우에는 염소이온의

* 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실 책임연구원

** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실 전임연구원

침투량이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

표 1. 공용 중인 콘크리트 노출 바닥판에서의 측정된 염소이온 함량(단위:kg/m³)

노선	지사	교량명	표면으로부터의 깊이(cm)						
			0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7
88선	남원	요천3교	3.1567	2.3271	1.6809	1.3613	1.2273	1.1921	1.0393
		유촌교	0.0353	0.0306	0.0282	0.0165	0.0141	0.0141	
구마선	군위	금호대교	0.0188	0.0235	0.0165	0.0118	0.0094	0.0094	
		화원IC교	0.2585	0.1998	0.1763	0.188	0.1716	0.1293	
호남선	전주	정읍천교	4.4674	5.6917	3.7741	2.5145	1.9529	0.9095	
		정읍철육교	0.1457	0.1657	0.2256	0.1962			
	광주	묘현교	1.7596	4.0262	3.5609	3.2119	2.4141		
		성산교	3.1590	3.1590	2.7701	2.3741	1.8924	1.5081	1.1721
중부선	경안	광지원2교	0.1199	0.0893	0.0658	0.0376	0.0235		
	진천	평동육교(건전)	1.4100	0.6300	0.4700	0.2800	0.1200		
		평동육교(손상)	7.2900	4.0000	2.8200				

3. 철근위치에서의 임계부식연한의 산정

콘크리트 노출 바닥판에 대한 콘크리트 코어 시편의 깊이별 염소이온의 침투 프로파일을 근거로, 향후 철근부식이 일어날 시기를 예측하고자 하였다. 이는 외부로부터 침투한 염화물이 철근위치까지 확산이동하여 철근 부식을 발생시키는 임계염화물 농도에 도달하는 시간을 산정하는 것으로 하였다. 산정시, 철근위치에서 염화물량이 1.2kg/m³에 도달하면 철근에 부식이 발생하고, 염화물의 침투 프로파일은 Fick의 확산방정식에 따르며, 경과시간 내에 균열발생 등의 다른 염화요인은 없다고 가정하였다.

3.1 염분 확산계수 및 표면 염화물량의 산정방법

염분 침투거동은 Fick의 제2법칙에 근거한 확산방정식에서 경계조건과 초기조건을 적용한 경우인 다음 식을 이용하여 실구조물의 코어 데이터에 대한 콘크리트의 표면염화물 이온농도 및 겉보기 확산계수를 동시에 산정하는 것으로 하였다.

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right)$$

여기서, $C(x,t)$: 시간 t (년)이 경과한 후 깊이 x (cm)에서의 염화물의 농도(kg/m³)

x : 콘크리트 표면으로부터의 거리(cm)

t : 공용기간(yr.)

C_0 : 콘크리트 표면에서의 염소이온함유량(kg/m³)

D : 확산계수(cm²/yr)

erf : 오차함수

표면 염화물량 및 겉보기 확산계수를 구하는 방법으로는 수치적으로 회귀분석을 하는 방법과 도해적으로 회귀분석을 하는 방법이 있는데, 여기서는 도해적으로 회귀분석을 하는 방법을 선택하여 다음과 같은 절차를 통해서 산정하였다.

- (1) 깊이별 염화물 분포로부터 콘크리트 표면 염화물량을 추정한다.
- (2) 각 깊이에서의 염화물량을 추정된 C_{a0} 을 사용한 $2C_{a0}$ 로 나누어 정규확률지에 플로팅한다. 여기서 정규확률지의 수직축은 $C(x,t)/2C_{a0}$ 이고 수평축은 깊이로 한다.
- (3) 확산방정식의 해로 회귀된 곡선은 정규확률지 상에는 수직축의

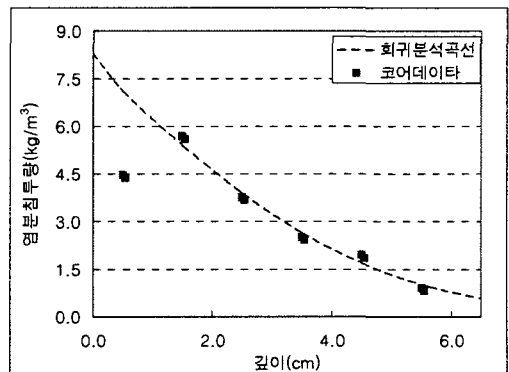


그림 1 표면 염화물량 및 겉보기 확산계수 산정 결과 (정읍천교)

0.5(50%)를 통과하는 것으로부터 수직축의 0.5(50%)를 통과하는 동일한 직선상에 각 깊이에 대한 플로팅점이 근사하도록 적절히 C_{a0} 를 변경한다.

- (4) 정규분포함수 $\Phi(x)$ 와 오차함수 $erf(x)$ 에는 $1-\Phi(\sqrt{2}x)=(1-erf(x))/2$ 의 관계가 있는 것으로부터 회귀직선의 기울기가 $1/\sqrt{2D_{ap}t}$ 로 되는 것을 이용하여 결보기 확산계수를 구한다.

3.2 공용중인 교량에서의 결보기 염분 확산계수 및 표면 염화물 이온량의 특성

위의 방법을 적용하여 공용중인 교량 바닥판에서 표면 염화물 및 결보기 확산계수를 산정하기 위해서는 어느 정도 바닥판에 염화물 침투가 발생한 이후이어야 한다. 그러나, 강설량 및 제설염화물의 살포량이 각각 다름에도 불구하고 염화물 침투량이 극히 작게 나타나는 교량이 있으며, 이러한 교량에서는 표면 염화물량 및 결보기 확산계수를 구하는 것이 곤란하였다. 실교량의 코어로부터 표면염화물량과 결보기 확산계수를 산정한 결과를 표 2에 나타내었다.

88선상의 남원관내 교량의 경우에, 두 교량의 RCPT 시험결과는 중간정도로 비슷하였지만, 실교량의 염분 침투량은 유촌교가 매우 작은 것으로 나타났다. 그러나, 요천3교의 경우에는 어느 정도 염분침투가 발생하였으며, 깊이별 염분침투 특성은 표면에서 0~3cm사이와 3cm 이하의 깊이에서 상당히 다른 특성을 보이고 있다. 즉, 표면부의 경우에는 표면 염화물이온량이 3.6kg/m^3 이고 결보기 확산계수는 $0.282\text{cm}^2/\text{yr}$ 이었으나, 3cm 이하의 깊이에서는 표면염화물이온량이 1.8kg/m^3 , 결보기 확산계수가 $3.452\text{cm}^2/\text{yr}$ 로 나타나 3cm 이하의 깊이에서는 확산계수가 급격히 큰 특성을 보이고 있다.

구마선상의 위치한 교량들의 경우에는 지역적으로 강설량이 작아 제설 염화물의 살포량이 작고, RCPT 시험결과도 투수성이 작은 것으로 나타나고 있으며 실제로 염화물 침투량도 매우 작은 상태에 있어서 거의 모든 바닥판이 양호한 외관상태를 유지하고 있다.

호남선상의 교량의 경우에는 전주관내의 교량인 정읍천교의 경우에는 상당히 높은 표면 염화물이 산정되었으나, 확산계수는 $0.347\text{cm}^2/\text{yr}$ 로 크게 높게 산정되지 않았다. 이는 RCPT 시험에서 투과성이 크지 않음을 보여주는 결과와 유사하다. 그러나 정읍철육교의 경우에는 RCPT가 정읍천교에 비해서 높게 나타났지만 염분침투량은 매우 작게 나타났다. 광주관내의 교량은 확산계수가 매우 높게 나타났으며 RCPT 시험결과도 매우 높게 나타났다. 이것은 광주관내의 바닥판에 타설된 콘크리트 품질이 양호하지 못하였던 것으로 추정되며, 이러한 결과로 이 지역의 콘크리트 노출 바닥판은 표면에 손상이 많이 발생하게 된 것으로 판단된다. 중부선상의 교량의 경우에는 광주원2교의 경우에는 염화물 침투량이 극히 적은 것으로 나타나고 있으며, 평동육교의 경우에는 손상부와 건전부에서 채취한 코어 사이에 결보기 확산계수는 유사하였으나, 손상부에서의 표면염화물 이온량은 건전부에 비해서 상당히 높게 나타났다.

3.3 바닥판의 내구수명의 산정

앞서 언급한 방법을 이용하여 각 교량의 표면 염화물량과 결보기 확산계수를 구하고, 그 결과를 교량의 대뿔값으로 가정하여 바닥판의 5%에 손상이 발생하는 경우에 대하여 내구수명을 구하여 표 2에 나타내었다. 바닥판의 5% 손상은 전체 바닥판 면적의 5%에 철근 부식이 발생하는 시점으로, 피복두께는 레이더 장비를 이용하여 바닥판 전체에 대해서 조사한 것이다. 염분침투량이 매우 작아서 표면염화물량과 결보기 확산계수를 산정하기 어려운 교량의 경우에는 염화물 침투로 인한 철근 부식의 우려가 없는 교량이라고 할 수 있다. 결보기 확산계수가 상당히 크게 나타난 광주관내 바닥판의 경우에는 두 교량 모두 현시점에서 철근위치에서의 염소이온량이 임계치를 초과하고 있어 내구연한을 다한 상태이어서, 본 교량에 대한 현장조사 후에 현재는 LMC 및 초속경 LMC에 의해서 덧씌우기 보수가 실시된 상태이다. 정읍천교의 경우에는 RCPT값과 결보기 확산계수 값이 크게 나타나지 않았으나, 표면 염화물량이 크게 나타나고 철근의 상부피복두께가 전체적으로 작게 시공되어 내구연한을 초과한 것으로 평가되었다. 평동육교의 경우에는 피복두께가 2~3cm 에 불과한 부위에서 손상이 발생되고 있지만 5% 이상의 손상이 발생한 경우에 보수를 실시하는 것으로 기준하면 향후 10년 이상 공용 후에는 전면적인 보수대책을 수립해야 할 것이다.

4. 결론

표 2 콘크리트 노출 바닥판의 철근위치에서의 일계부식연한의 산정 결과

노선	지사	교량명	표면염화물농도 (kg/m ³)	겔보기 확산계수 (cm ² /yr)	바닥판의 5% 피복 (cm)	부식연한 (년)	RCPT (Coulombs)
88선	남원	요천3교(0~3cm)	3.60	0.283	6.01	71	3654
		요천3교(3cm이상)	1.8	3.452	6.01	28	3654
		유촌교	-	-	-	-	3591
구마선	군위	금호대교	-	-	-	-	1569
		화원IC교	-	-	-	-	1884
호남선	전주	정읍천교	8.30	0.347	4.34	13	1149
		정읍철육교	-	-	-	-	1887
	광주	묘현교	4.65	2.10	5.00	5	4740
		성산교	4.00	1.085	7.07	21	8328
중부선	경안	광지원2교	0.135	0.347	6.58	-	2421
		평동육교(건전부)	1.77	0.145	4.61	421	
		평동육교(손상부)	8.50	0.165	4.61	30	

주) - : 염화물 침투량이 매우 작아 부식연한을 계산하지 않음

제설 염화물의 살포에 따른 고속도로상에 공용 중인 콘크리트 노출 바닥판의 내구수명예측을 수행하고자 현장실험에 의한 깊이별 염소이온량을 조사하여 회귀분석을 통해 표면 염화물량과 겔보기 확산계수를 구하고, 급속염분투과시험을 실시하여 실교량의 염분 침투특성을 분석하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강설량이 작아서 제설염화물이 적게 살포되는 구마고속도로상의 교량은 물론 상당량의 제설염화물이 살포되는 88, 호남, 중부고속도로상의 교량에서도 염화물 침투량이 매우 적은 교량이 존재하고 있다. 이러한 교량들은 공용수명동안 철근부식에 의한 바닥판의 손상은 우려하지 않아도 될 것으로 판단되며, 이는 양호한 상태로 시공된 콘크리트 노출 바닥판은 교량 공용수명 동안 별다른 유지관리없이 사용가능하다는 것으로 보여준다.
- 2) 광주지사관내의 교량은 전체적으로 겔보기 확산계수 및 RCPT 값이 높게 나타나 콘크리트의 품질이 양호하지 않은 상태로 시공된 것으로 판단된다. 이러한 교량들의 손상원인은 주로 저급한 콘크리트의 사용에 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) 정읍천교의 경우에는 RCPT값과 겔보기 확산계수 값이 크게 나타나지 않았으나, 표면 염화물량이 크게 나타나고 철근의 상부피복두께가 전체적으로 작게 시공되어 내구연한을 초과한 것으로 평가되었다. 이러한 교량은 피복두께가 설계치에 크게 미치지 못한 것으로 인해 부분적인 조기손상 및 전체적인 사용수명이 단축된 것으로 판단된다.
- 4) 실교량에서 공용 중인 콘크리트 노출 바닥판의 염분침투특성을 분석한 결과, 바닥판의 내구수명을 증진시키기 위해서는 투수성이 작은 콘크리트의 사용, 충분한 상부철근의 피복두께 확보, 그리고 표면에서의 염분투과성을 감소시키는 것이 중요한 것으로 판단된다.
- 5) 따라서, 콘크리트 노출 바닥판을 적용시, 보다 내구성을 증진시키기 위해서 콘크리트의 투수성을 저하시킬 수 있는 고성능 콘크리트의 적용과 피복관리, 침투식 방수제의 품질 확보가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국도로공사, "콘크리트 노출 바닥판의 적용 및 유지관리에 관한 연구", 도로교통 ST-04-03, 2005
2. Weyers, R. E., Fitch, M. G., Laren, E. P., Al-Quadi, I. L., Chamberlin, W. P. and Hoffman, P. C., "Concrete Bridge Protection and Repair, and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion: A Methods Application Manual," SHRP-S-360, National Research Council, Washington D.C. 1994
3. Whiting, D. and Detwiler, R., "Silica Fume", 1993
4. Richard E. Weyers, et al, "Concrete Bridge Protection and Rehabilitation : Service Life Estimates", SHRP-S-668, National Research Council, Washington D.C. 1994