

고속도로 콘크리트 노출 바닥판에서의 제설 염화물의 침투 특성

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

서진원*
Suh, Jin Won

구본성*
Ku, Bon Sung

이지영**
Rhee, Ji Young

Abstract

In 1980s, a number of bridges with bare concrete deck were constructed on the Korea highway. After 20 years service, many bare concrete decks are still in good condition without special maintenance activity. Therefore, the application of the bare concrete deck is being reestimated from the view of construction and maintenance. As a part of the program, the characteristic of penetration(surface chloride and apparent diffusion coefficient) of de-icing salt into bare concrete bridge deck was analyzed in order to predict the service life of bridge on Korea highway.

요 지

콘크리트 노출 바닥판은 88 고속도로, 호남고속도로 확장, 제1중부고속도로 등의 1980년대에 건설된 고속도로 교량에 널리 적용되었다. 약 20년 정도 공용한 후에 콘크리트 노출 바닥판의 상태를 평가한 결과, 상당수의 교량들이 특별한 유지관리비가 소요되지 않고 공용중이다. 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 고속도로 상에 공용중인 콘크리트 노출 바닥판에서 코어를 채취하여 깊이별 염화물을 측정하여 표면 염화물량 및 겉보기 확산계수를 구하였다.

Keywords : Bare concrete bridge deck, De-icing chemicals, Diffusion coefficient, Permeability

핵심 용어 : 노출 콘크리트 바닥판, 제설염화물, 확산계수, 침투

* 정회원, 한국도로공사 책임연구원

** 정회원, 한국도로공사 전임연구원

E-mail : jw_seo@freeway.co.kr 031-371-3323

•본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

'80년대에 건설된 88고속도로, 호남고속도로 확장, 제1중부고속도로에서는 도로포장이 콘크리트 포장으로 대체되면서 교면포장도 아스팔트를 사용하지 않고 마모층 개념을 도입하여 콘크리트 피복두께를 4cm 정도 증가시킨 6~10cm로 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, 양호한 콘크리트의 품질과 피복두께가 확보된 경우에 현재까지 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 세설 염화물의 침투 특성을 파악하기 위해 고속도로 상에 공용중인 콘크리트 노출 바닥판에서 깊이별 염화물을 측정하여 표면 염화물 함량과 겉보기 확산계수를 구하고, 차량 탐재형 레이더를 이용하여 바닥판의 피복두께를 측정하여 바닥판의 내구수명을 평가하였다.

2. 염화물 침투에 의한 바닥판의 열화

염해에 의한 콘크리트 구조물의 열화과정은 Fig. 1 과 2에 나타난 바와 같이 잠재기, 진전기, 축진기, 한계기의 4단계의 열화모델로 정의할 수 있다. 여기에서 각 열화단계는 다음 Table 1과 같이 정의된다.

각 기간별로 주된 열화 메커니즘이 다르므로 정확한 열화예측을 위해서는 시기별로 실험 및 실측결과와의 비교를 통해 타당성이 입증된 적절한 열화모델을 적용해야만 한다. 열화 예측의 결과가 실제 점검결과와 일치하는 것이 가장 바람직하겠지만, 실제로는 열화예측에 적용된 열화모델과 데이터의 불확실성으로 인해 열

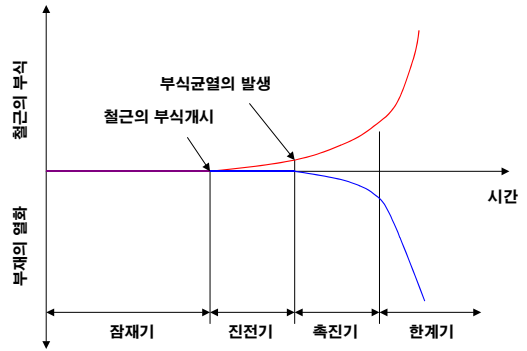


Fig. 1 열화모델의 가정

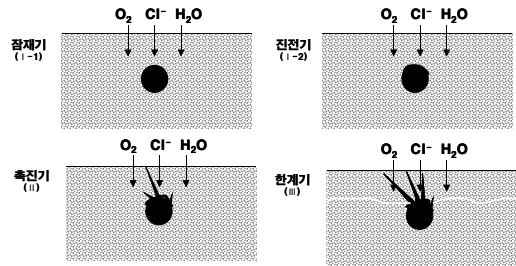


Fig. 2 열화단계별 열화 진행과정

화에측결과와 점검결과가 일치하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 점검 시점에서 열화단계를 판정하는 것은 반드시 육안조사, 부식속도 및 염소이온농도 측정결과 등 다른 점검결과를 종합적으로 분석한 후 시행해야만 한다.

Table 1 각 열화단계의 정의

열화 단계	정의	주된 인자
잠재기	철근의 부식발생 이전까지의 기간, 즉 염소이온의 침투에 의해 철근위치에서의 염소이온농도가 부식임계농도에 도달하기까지의 시간	염소이온의 확산속도, 부식임계농도, 초기 및 표면염소이온농도
진전기	철근의 부식발생 이후, 콘크리트 표면에 부식균열이 발생하기까지의 기간	부식속도, 균열임계부식도
축진기	부식속도가 증가하지만, 구조적 성능의 감소가 크게 나타나지 않는 기간	균열이후의 부식속도, 부식도에 따른
한계기	부식속도가 급격히 증가하고, 구조적 성능의 저하가 현저히 발생하는 기간	부재내력의 감소정도

Table 2 육안조사에 의한 열화단계 구분

열화 단계	열화 등급	외관상 열화상태
잠재기	I-1	외관상 변화 없음
진전기	I-2	
축진기	II	부식균열, 녹물 및 부분적 박리 관찰
한계기	III	부식균열 다수 발생 균열폭이 크고, 녹물이 번진 면적이 넓음 피복의 들뜸, 박리 및 탈락 관찰 변위 및 처짐이 큼

Table 2는 열화단계에 따른 외관상의 등급을 나타내고 있다.

3. 확산법칙에 의한 바닥판의 내구수명 평가방법

3.1 염분 확산계수와 표면염화물량의 산정

염화물에 의한 구조물의 열화과정에서 일반적으로 잠재기에 비해서 진전기는 상대적으로 매우 짧으므로 염화물이 임계염화물에 도달할 때까지의 잠재기에 대해서 내구수명을 평가하는 것이 중요하다. 따라서, 외부로부터 침투한 염화물이 철근위치까지 확산이동하여 철근 부식을 발생시키는 임계염화물 농도에 도달하는 시간을 평가하여 산정하는 것으로 하였다. 수명평가지, 철근위치에서 염화물량이 1.2kg/m^3 에 도달하면 철근에 부식이 발생하고, 염화물의 침투 프로파일은 Fick의 확산방정식에 따르며, 경과시간 내에 균열발생 등의 다른 열화요인은 없다고 가정하였다. Fick의 제 2법칙에 경계조건과 초기조건을 적용한 경우인 다음식을 이용하여 실구조물의 코어 데이터에 대한 콘크리트의 표면염화물 이온농도 및 겔보기 확산계수를 동시에 산정하고, 이것에 상부철근의 피복두께를 대입하여 수명을 평가하는 것으로 하였다.

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

여기서, $C(x,t)$: 시간 t (년)이 경과한 후 깊이 x (cm)에서의 염화물의 농도(kg/m^3)

x : 콘크리트 표면으로부터의 거리(cm)

t : 공용기간(yr)

C_0 : 콘크리트 표면에서의 염소이온함량(kg/m^3)

D : 확산계수(cm^2/yr)

erf : 오차함수

표면 염화물량 및 겔보기 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_{∞} 을 사용한 $2C_{\infty}$ 로 나누어 정규확률지에 플로팅한다. 여기서 정규확률지의 수직축은 $C(x, t)/2C_{\infty}$ 이고 수평축은 깊이로 한다.
- (3) 확산방정식의 해로 회귀된 곡선은 정규확률지 상에는 수직축의 0.5(50%)를 통과하는 것으로부터 수직축의 0.5(50%)를 통과하는 동일한 직선상에 각 깊이에 대한 플로팅점이 근사하도록 적절히 C_{∞} 를 변경한다.
- (4) 정규분포함수 $\Phi(x)$ 와 오차함수 $\text{erf}(x)$ 에는 $1 - \Phi(\sqrt{2}x) = \{1 - \text{erf}(x)\}/2$ 의 관계가 있는 것으로부터 회귀직선의 기울기가 $1/\sqrt{2D_{ap} \cdot t}$ 로 되는 것을 이용하여 겔보기 확산계수를 구하는 것이 가능하다. 예를 들면 종축의 0.5(50%)을 통과하는 직선이 결정된 후에 다음식으로부터 겔보기 확산계수를 계산하는 것이 가능하다.

$$D_{ap} = \left(\frac{x_{3\sigma}}{3} \right)^2 \times \frac{1}{2t}$$

여기서, D_{ap} : 침투시험에 의한 겔보기 확산계수(cm^2/yr)

$x_{3\sigma}$: 종축의 값이 0.00135(0.13%)로 되는 깊이(cm)

t : 침투기간(yr)

Table 3 공용 중인 콘크리트 노출 바닥판에서의 측정 한 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
충부선	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				

3.2 공용 바닥판에서의 염소이온함유량

콘크리트 노출 바닥판 교량에 대한 기존의 현장 점검 자료 및 육안조사결과를 근거로 하여 각 노선별 또는 지사별로 1~2개소씩의 교량을 선정하여 코어를 채취하여, 10mm 단위별로 깊이 에 따른 염소이온량을 측정하여 Table 3 및 Fig. 3에 나타내었다. 표에 나타낸 바와 같이 동일 노선 상에 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 침투량이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

3.3 겉보기확산계수 및 표면염화물량

앞의 3.1절의 방법을 적용하여 공용중인 교량 바닥판에서 표면 염화물 및 겉보기 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 겉보기 확산계수를 구하는 것이 곤란하였다. 실 교량에서 채취한 코어로부터 표면염화물량과 겉보기 확산계수를 산정한 예와 교량별 산정결과를 Fig. 4와 Table 4에 나타내었다.

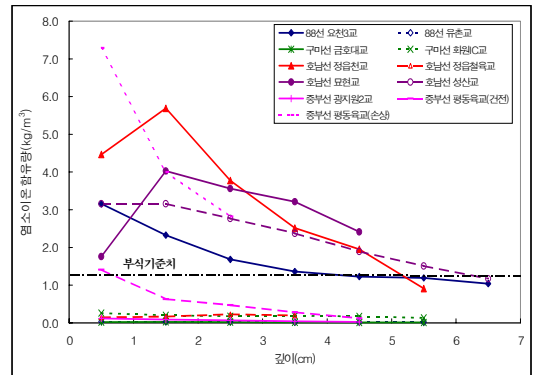


Fig. 3 공용중인 노출 바닥판에서의 깊이별 염소이온침투량 측정결과

88선상의 남원관내 교량의 경우에, 두 교량의 RCPT 시험결과는 중간정도로 비슷하였지만, 실교량의 염분 침투량은 유촌교가 매우 작은 것으로 나타났다. 그러나, 요천 3교의 경우에는 어느 정도 염분침투가 발생하였으며, 깊이별 염분침투 특성은 표면에서 0~3cm 사이와 3cm 이하의 깊이에서 상당히 다른 특성을 보이고 있다. 즉, 표면부의 경우에는 표면 염화물이온량이 3.6kg/m³이고 겉보기 확산계수는 0.282cm²/yr이었으나, 3cm 이하의 깊이에서는 표면염화물이온량이 1.8kg/m³, 겉보기 확산계수가 3.452cm²/yr로 나타나 3cm 이하의 깊이에서는 확산계수가 급격히 큰 특성을 보이고 있다.

구마선상의 위치한 교량들의 경우에는 지역적으로

Table 4 겉보기 확산계수와 염소이온 침투 저항성

노선	지사	교량명	표면염화물농도 (kg/m ³)	겉보기 확산계수 (cm ² /yr)	RCPT (Coulombs)
88선	남원	요천3교(0~3cm)	3.60	0.283	3654
		요천3교(3cm이상)	1.80	3.452	3654
		유촌교	*	*	3591
구마선	군위	금호대교	*	*	1569
		화원IC교	*	*	1884
호남선	전주	정읍천교	8.30	0.347	1149
		정읍철육교	-	-	1887
	광주	묘현교	4.65	2.100	4740
		성산교	4.00	1.085	8328
중부선	경안	광지원2교	0.135	0.347	2421
	진천	평동육교(건전부)	1.77	0.145	-
		평동육교(손상부)	8.50	0.165	-

주) * : 염화물 침투량이 매우 작아 겉보기 확산계수를 산정하지 않음

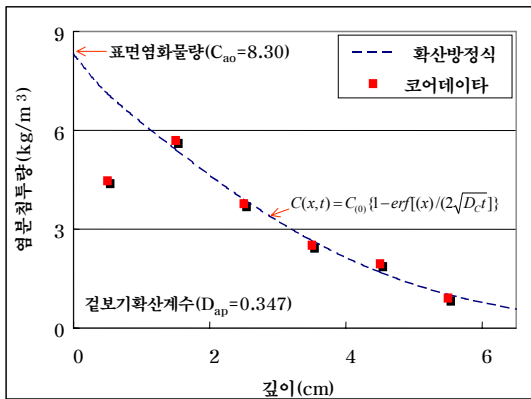


Fig. 4 표면 염화물량 및 겉보기 확산계수 산정 결과 (정읍천교)

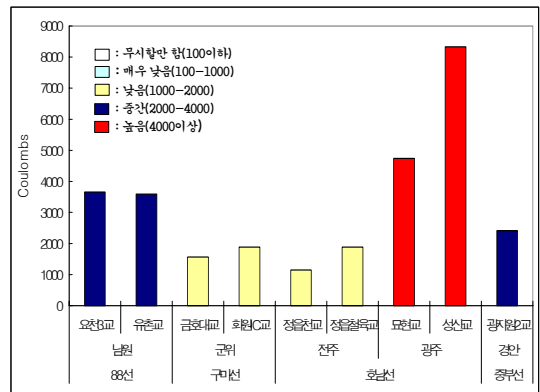


Fig. 5 급속염분침투저항성(RCPT) 평가 결과

강설량이 작아 제설 염화물의 살포량이 작고, RCPT 시험결과도 투수성이 작은 것으로 나타나고 있으며 실제로 염분침투량도 매우 작은 상태에 있어서 거의 모든 바닥판이 양호한 외관상태를 유지하고 있다.

호남선상의 교량의 경우에는 전주관내의 교량인 정읍천교의 경우에는 상당히 높은 표면 염화물이 산정되었으나, 확산계수는 0.347cm²/yr로 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 교

량은 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 광지원 2교의 경우에는 염화물 침투량이 극히 적은 것으로 나타나고 있으며, 평동육교의 경우에는 손상부와 건전부에서 채취한 코어 사이에 겉보기 확산계수는 유사하였으나, 손상부에서의 표면염화물량은 건전부에 비해서 상당히 높게 나타났다.

3.4 교량별 상부철근 피복두께 평가 결과

Fick's 제2법칙에 따라 확산방정식에 의해서 수명을 평가하는 경우에, 사용수명은 철근 피복두께의 제곱에 비례한다. 따라서, 공용중인 바닥판의 내구수명을 평가하기 위하여 차량 탑재형 GPR을 이용하여 바닥판 전체에 대한 피복두께를 측정하였다.

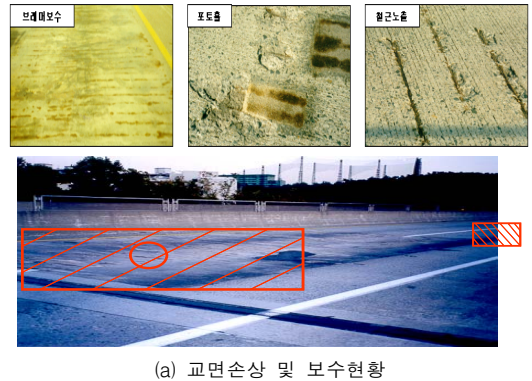
Fig. 6은 피복두께를 측정한 실교량에서의 상부철근 피복두께 분포도의 예를 등고선형식으로 나타낸 것이며, 설계피복두께가 8~9cm인 교량에서 피복두께가 설계치에 크게 미치지 못하게 시공된 부위를 중심으로 손상이 발생되고 있음을 보여주고 있다. 미국의 경우에, 바닥판 상면에 5%의 면적에 손상이 발생되는 경우에 전면적인 보수대책을 수립하도록 하고 있다. 따라서, 전체의 5%에 해당하는 피복두께와 평균피복두께 그리고 설계치를 Table 5에 정리하였다.

3.5 바닥판의 내구수명의 산정

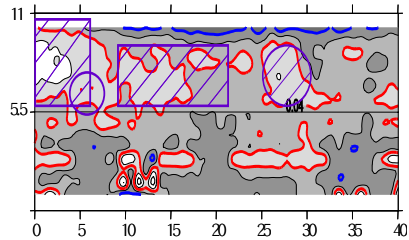
제설 염화물 사용량이 작은 구마선 상의 교량의 경우에 염화물 침투량이 임계부식염화물량에 비해서 매우 작았다. 또한, 염화물이 상당량 사용되는 88선, 호남선, 중부선 상의 양호한 교량의 경우에도 매우 작은 염분침투량을 보여주고 있다. 이러한 교량들의 경우에는 염화물 침투로 인한 철근 부식에 의한 손상 우려가 없음을 보여준다.

겉보기 확산계수가 상당히 크게 나타난 광주관내 바닥판의 경우에는 두 교량 모두 현시점에서 철근위치에서의 염소이온량이 임계치를 초과하고 있어 잠재기를 지난 상태이며, 묘현교의 경우에는 촉진기 또는 한계기에 도달한 상태인 것으로 판단된다. 따라서, 본 교량들은 현장조사 후에, LMC 및 초속경 LMC에 의해서 덧씌우기 보수를 실시하였다.

정읍천교의 경우에는 RCPT값과 겉보기 확산계수가 크게 나타나지 않았으나, 표면 염화물량이 크게 나타나고 철근의 상부피복두께가 전체적으로 작게 시공되어 내구연한을 초과한 것으로 평가되었다.



(a) 교면손상 및 보수현황



(b) 상부철근 피복두께 조사결과(붉은선 4cm, 파란선 6cm)

Fig. 6 중부선 강서육교(하남)

Table 5 상부철근 피복두께 조사결과

노선	위치	교량명	평균	표준편차	5% 면적값	설계값
88선	남원	요천3교	8.31	1.64	6.01	8.0
		유촌교	11.23	3.27	6.65	7.0
구마선	군위	금호대교	7.65	1.95	5.00	6.0
		화원IC교	9.54	1.49	8.10	10.0
호남선	광주	정읍천교	6.26	1.65	4.34	8.0
		묘현교	7.31	1.64	5.00	8.0
		성산교	8.56	1.35	7.07	8.0
중부선	경안	광지원2교	9.12	2.08	6.58	9.0
	진천	평동육교	6.69	2.21	4.61	9.0

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.

Table 6 콘크리트 노출 바닥판의 철근위치에서의 임계부식연한의 산정 결과

노선	지사	교량명	표면염화물농도 (kg/m ³)	겉보기 확산계수 (cm ² /yr)	바닥판의 5% 피복 (cm)	부식 연한 (년)	RCPT (Coulombs)
88선 (공용 18년)	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 (공용 18년)	군위	금호대교	-	-	-	*	1569
		화원IC교			-	*	1884
호남선 (공용 16년)	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 (공용 17년)	경안	광지원2교	0.135	0.347	6.58	*	2421
	진천	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

4. 결 론

제설 염화물의 살포에 따른 고속도로상에 공용 중인 콘크리트 노출 바닥판의 내구수명을 예측하고자, 상부 철근의 피복두께 및 현장실험에 의한 깊이별 염소이온량을 조사하여 표면 염화물량과 겉보기 확산계수를 구하고, 급속염분투과시험을 실시하여 실교량의 염분 침투특성을 분석하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강설량이 작아서 제설염화물이 적게 살포되는 구마 고속도로상의 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 교량공용수명 동안 별다른 유지관리없이 사용이 가능하다는 것으로 보여준다.
- 2) 광주지사관내의 교량은 전체적으로 겉보기 확산계

수 및 RCPT 값이 높게 나타나 콘크리트의 품질이 양호하지 않은 상태로 시공된 것으로 판단된다. 이러한 교량들의 손상원인은 주로 저급한 콘크리트의 사용에 기인하는 것으로 판단된다.

- 3) 정읍천교 및 평동육교의 경우에는, 겉보기 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, 적절한 콘크리트 및 침투식 방수제의 품질 관리와 철근피복두께 관리가 이루어지는 경우에

콘크리트 노출 바닥판은 장기공용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국도로공사, "콘크리트 노출 바닥판의 적용 및 유지 관리에 관한 연구", 도로교통 ST-04-03, 2005.
2. 장승엽, 장봉석, "염해에 대한 콘크리트 구조물의 내구성 설계예제", KCI-C-06-001, 한국콘크리트학회, 2006. 3.
3. 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.
4. Richard E. Weyers, et al, "Concrete Bridge Protection and Rehabilitation : Service Life Estimates", SHRP-S-668, National Research Council, Washington D.C. 1994.

(접수일자 : 2006년 6월 15일)