고속도로 교량의 염소이온확산 특성과 공용수명 평가

Diffusion of Chloride Ions and Evaluation of Lifetime in Highway Bridges

신 재 인* 박 창 호** 이 병 주*** 김 형 수***

Shin, Jae-In Park, Chang-Ho Lee, Byeong-Ju Kim, Hyeong-Su

Abstract

Chloride attach is one of the main factors which cause the deterioration of structures. In the case highway bridges, de-ice salts very significantly increase the surface scaling due to frost action. The deteriorated concrete is subject to experience degrading of durability under chloride attach environment. In this study, diagnosis report of 147 bridges is investigated and core sample of 21 bridge decks is examined and analyzed. The results show that the cover of decks concrete is required more than 8cm for retaining bridge lifetime over 30 years.

요 지

염해는 구조물 열화의 원인이 되는 주요인자 중의 하나이다. 고속도로 교량에 있어서 제설제는 동결작용으로 인한 표면 스켈링을 매우 증가시킨다. 열화된 콘크리트는 염해환경에서 내구성이 저하된다. 본 연구에서는 147개 교량의 진단보고서를 조사하고 21개 교량 바닥판의 코어샘플에 대하여 실험과 분석을 실시하였다. 시험결과는 콘크리트 바닥판의 피복두께는 공용수명 30년 이상을 사용하려면 8cm이상이 필요하다는 것을 보여준다.

Keywords : Chloride attack, Deteriorated concrete, Deck concrete

핵심 용어 : 염해, 열화 콘크리트, 바닥판 콘크리트

* 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 과장, 공학박사

** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원, 공학박사

*** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, 공학박사

E-mail : jaein68@ex.co.kr 031-371-3339

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2008년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

고속도로는 교통흐름이 멈추지 않아야 하는 국가의 기간시설이기 때문에 눈이 많은 겨울철에도 설계속도를 유지하기 위하여 제설제의 사용은 피할 수 없다. 이러한 제설제에 직접 노출되는 바닥판은 염해로 인해 피해를 가장 많이 받는 부재이다. 바닥판에 살포된 염분은 조인트부의 누수로 인해 교량받침의 부식을 촉진시키고 교각 및 교대 코핑부의 콘크리트 열화 그리고 강박스 거더 등의 상부구조의 부식을 촉진시킨다. 콘크리트의 조기열화로 인한 구조물의 성능저하 및 내구성저하가 심각한 사회문제로 대두됨에 따라 콘크리트의 내구성을 증진시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.[(1)-(8)]

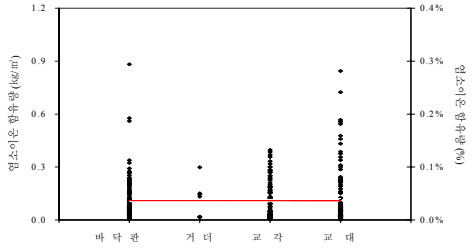
본 논문에서는 콘크리트 내구성 저하의 주요요인인 염해를 조사하기 위하여 고속도로 교량의 정밀안전진단보고서와 교량바닥판에서 채취한 시료를 분석하고 고속도로 교량의 염소이온 확산특성과 공용수명을 평가하여 교량의 예방적 유지관리 방안[(1)(2)]을 마련하는데 있다.

2. 고속도로 교량의 염화물 함유량

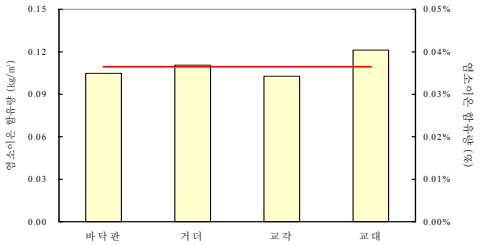
한국도로공사에서 '96년부터 '04년까지 실시한 고속도로 교량 147개소의 정밀안전진단보고서를 바탕으로 교량의 부재별, 주변환경에 따른 염화물 함유량에 대한 분석을 실시하였다. 고속도로 교량의 염화물 함유량은 0.109kg/㎥(수용성 염화물, 단위시멘트 중량대비 0.0365%)로 ACI 318과 국내 콘크리트시방서에서 규정하고 있는 0.3% (0.9kg/㎥, 단위시멘트량 300kg/㎥으로 가정)보다 매우 적은 양으로 양호한 값을 나타내었다.

교량의 부재별 염화물 함유량은 각 부재별로 요구강도 즉, 물-시멘트비나 단위시멘트량에 대한 차이가 있기 때문에 염화물의 흡착, 확산특성 등이 각기 다르게 나타날 수 있다. 이에 따라 바닥판 하면, 거더 외부, 교각, 교대에 대하여 각각 염화물 함유량을 정리하여 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1(a)는 각 부재의 염화물 함유량을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 바닥판과 교대의 경우 몇몇 교량이 높은 염화물 함유량을 나타내는 것을 알 수 있으며, 이는 바닥판 상부의 균열과 신축이음의 파손 등으로 발생하는 누수의 영향으로 판단된다. 또한 Fig. 1(b)는 각 부재의 평균 염화물 함유량을 나타낸 것으로, 교대와 거더에서 염화물 함유량이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 프리스트레스트 콘크리트를 사용하는 거더의 경우 최대 수용성 염화물을 0.18kg/㎥(0.06%)로 규정하고 있는 것을 고려해보면 0.111kg/㎥(0.037%)로 매우 높은 수치를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.



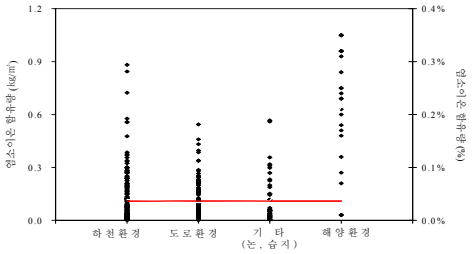
(a) 부재별 염소이온 함유량



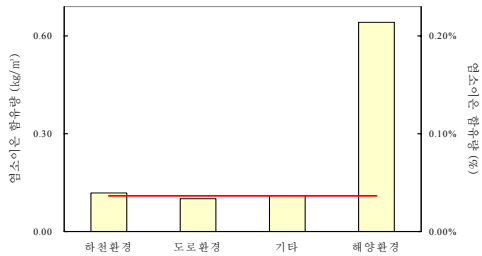
(b) 부재별 평균 염소이온 함유량

Fig. 1 교량의 부재별 염소이온 함유량

고속도로 교량의 주변환경에 따른 염화물 함유량에 대한 영향을 알아보기 위해 교량의 하부상태에 따라서 하천환경, 도로환경 그리고 논, 습지 등 기타환경으로 구분하였다. 또한 기존연구에서 발표된 해양환경의 교량에 대해서도 같이 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 각 환경에 따른 평균 염화물 함유량은 하천환경 0.118kg/㎥(0.039%), 도로환경 0.101kg/㎥(0.034%), 기타환경 0.111kg/㎥(0.037%)로 나타났으며, 해양환경에 위치한 교량의 경우 0.642kg/㎥(0.214%)로 매우 높은 염화물 함유량을 나타내었다.



(a) 주변환경에 따른 염소이온 함유량



(b) 주변환경에 따른 평균 염소이온 함유량

Fig. 2 교량의 주변환경에 따른 염소이온 함유량

이와 같이 해양환경의 높은 염화물 함유량은 비래염분에 의한 영향으로 판단된다. 고속도로 교량의 경우에는 주변 환경에 따라 거의 유사한 염화물 함유량을 나타내었으나, 상대습도가 높고 건·습이 반복되는 하천환경에서는 약간 높은 염화물 함유량을 나타내는 것을 알 수 있다.

3. 콘크리트내 염소이온 확산 특성

염소이온 확산계수에 영향을 미치는 주요요인은 혼화재의 치환량, 물-시멘트비 등이 있으며, 염소이온 확산계수는 시간의 경과에 따라 수화도 및 공극구조의 향상으로 인하여 감소한다. 따라서 콘크리트의 염소이온 확산계수는 초기재령(약 5년)에서는 계속적으로 감소하지만, 장기적으로는 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.[3] Table 1은 이러한 시간의존적인 콘크리트의 염소이온 확산계수에 대한 기존 연구를 정리하여 나타낸 것이다. Table 1의 염소이온 확산계수 모델 중 시간경과에 따라 염소이온계수의 증가량이 지속적으로 감소하는 Maage 등의 식이 가장 보편적으로 인정되

Table 1 시간의존적 염소이온 확산계수(D_{Cl}) 에 대한 기존 연구 및 모델

기존연구문헌	염소이온 확산계수 모델
Maage et al, 1995 Takeda, 1996	$D_{Cl}(t)=D_r\cdot\left(\frac{t_r}{t}\right)^{-m}$ t_r : 공용기간(year) D_r : t_r에서 염소이온 확산계수 m : 시간 감소계수 Mangat et al., 1994 $m=0.6-2.5W/C$
Bamforth, 1997	$\log D_{Cl}(t)=-a\sqrt{t}+b$ a, b : 상수
Takewaka, 1988	$D_{Cl}(t)=D_{w/c}\cdot D_0\cdot t^{-m}$ $D_{w/c}$: 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산계수 D_0 : 초기 염소이온 확산계수
Kanaya, 1998	$D_{Cl}(t)=a\cdot e^{-bt}+c$ a, b, c : 상수

Table 2 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산계수(D_{Cl})

기존연구문헌	염소이온 확산계수 모델
Henriksem et al., 1996(I)	$D_{Cl}=3000\cdot(w/c)^5$ 염소이온 확산계수의 단위 : ㎟/year
Hobbs et al., 1998(II)	$D_{Cl}=0.04(1166w/c)\times10^{-12}$ 염소이온 확산계수의 단위 : 10-8㎠/sec
Snyder et al., 1995(III)	$D_{Cl}=10^{(6w/c-13.84)}$ 염소이온 확산계수의 단위 : ㎠/sec
Lin, 1990(IV)	$D_{Cl}=8.941(w/c)^2-5.051(w/c)+1.249$
JSCE	$\log D_{Cl}=a(w/c)^2+b(w/c)+c$ a, b, c : 상수

며, m은 $0\leq m<1$의 조건에서 유효하다. Table 2는 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산계수에 대한 연구를 정리하여 나타낸 것이다.

3.1 염소이온 확산방정식

염소이온의 확산은 농도차에 의해 유발되는 이온의 확산으로 높은 농도를 가진 지역에서 낮은 농도를 가

진 지역으로의 흐름이다. 이런 염소이온의 확산은 농도차, 즉 농도경사에 비례하며 식(1)과 같이 Fick의 제 1법칙으로 표현할 수 있다.

$$J = -D\frac{dC}{dx} \quad (1)$$

이 때, J는 농도경사이며, C는 염소이온의 농도이다. D는 확산계수이며, 이 식에서 (-)는 염소이온이 농도가 높은 지역에서 낮은 지역으로 확산되는 것을 의미한다. Fick의 제1법칙은 다시 과도확산과정(transient diffusion process)의 단위시간 및 부피에 대한 농도의 변화를 고려하여 식(2)와 같이 표현하며, 이를 Fick의 제2법칙이라 한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

Eric 등[8]은 초기에 염화물이 함유되어있지 않으며, 표면염화물의 농도를 일정하다고 가정하고 식(3)과 같이 엄밀해의 방정식을 제안했다.

$$C(x,t) = C_0\left(1 - erf\left[\frac{x}{2\sqrt{D_{Cl}\cdot t}}\right]\right) \quad (3)$$

여기서,

$C(x,t)$: 시간 t와 깊이 x에서의 염화물량 또는 염소이온함유량 (kg/㎥ 또는 %)

C_0 : 표면 염화물량 또는 염소이온함유량 (kg/㎥ 또는 %)

$erf(x)$: error function

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-\xi)d\xi$$

D_{Cl} : 염소이온 확산계수 (㎠/sec 또는 ㎠/year)

x : 콘크리트 표면으로부터의 깊이 (㎝)

t : 경과시간 (sec 또는 year)

3.2 고속도로 교량의 염소이온 확산특성

콘크리트 구조물의 염해에 대한 내구성 평가를 위하여 표면 염화물량(C_0)과 염소이온 확산계수(D_{Cl})의 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 고속도로 교량 21개소의 바닥판 상부에서 채취한 42개의 콘크리트 코어를 일본콘크리트공학협회에서 규정한 실험방법에 의하여 산-가용성 염화물량(고정염화물량, 총염화물량)을 콘크리트 깊이에 따라 측정하였다. 또한 교량 바닥판의 염소이온 확산계수를 Fick의 제2법칙을 이용하여 산출하였다.

콘크리트 구조물에서 표면 염화물량은 주변환경, 즉 염화물에 대한 노출정도, 온도, 습도 등에 의하여 크게 영향을 받으며, 염소이온 확산계수는 콘크리트의 물-시멘트비, 공극특성 등에 의하여 영향을 받는다. 본 절에서는 교량의 부재 중 염화물에 대한 손상을 가장 크게 받는 바닥판에 대하여 콘크리트 코어를 채취하여 산-가용성 염화물량(고정염화물량, 총염화물량)을 측정하였다.

콘크리트 표면의 염화물량(C_0)은 국내 해안선으로부터 거리에 따라 계측한 값을 사용하도록 권고하고 있으나, 교량의 바닥판과 같이 비래염분의 영향이 아닌 제설제에 영향을 받는 경우는 지역별로 겨울철에 사용되는 제설염의 양과 표면 염화물량의 관계를 분석하는 것이 우선되어야 할 것이다.

바닥판에서 채취한 코어의 깊이별 염화물량을 실험을 통하여 구하였고, 이를 정리하여 콘크리트 깊이에 따른 평균염화물량을 Table 3에 정리하였다. Fig. 3은 콘크리트 깊이에 따른 염화물량을 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 깊이에 따라 염화물량이 작게 나타난 것을 볼 수 있다.

Fig. 3과 4에서 실선으로 나타낸 부분은 철근의 부식을 일으키는 임계염화물량인 1.2kg/㎥(0.4%)를 나타낸 것으로, Fig. 3에 나타난 바와 같이 염화물에 의한 바닥판의 손상이 매우 심각함을 알 수 있다. Fig. 4는 공용년수에 따른 바닥판의 염화물량을 나타낸 것

Table 3 콘크리트 깊이에 따른 평균 염화물량

콘크리트 깊이 (㎝)		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
평균 염화물량	kg/㎥	0.728	0.588	0.502	0.380	0.326
	시멘트 중량대비%	0.243	0.196	0.167	0.127	0.109

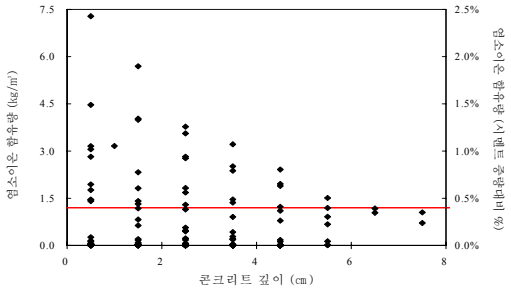


Fig. 3 콘크리트 깊이에 따른 염화물량

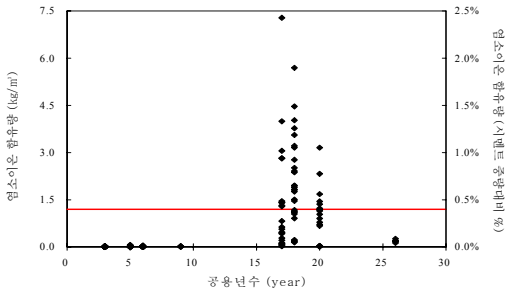


Fig. 4 공용년수에 따른 염화물량

으로 교량이 공용 후 10년이 지나면서 염화물량이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 침투되는 염화물이 축적됨과 동시에 균열, 동결융해, 중성화 등의 영향으로 콘크리트 공극구조에 변화가 일어나게 되어 염소이온의 확산이 빠르게 진행되기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 Table 2의 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산계수에 대한 기존 연구 모델을 나타낸 것으로, 교량 바닥판의 경우 물-시멘트비를 45%로 가정한다면 염소이온 확산계수는 0.228~0.787㎠/year정도의 값을 나타낸다. 본 연구에서는 Fick의 제 2법칙에 의하여 염소이온 확산계수를 산출하였으며 바닥판의 콘크리트 코어에서 구한 표면염화물량을 이용하였다. Fig. 6과 7은 콘크리트 깊이와 공용년수에 따른 염소이온 확산계수를 나타내었다. 산출된 염소이온 확산계수는 앞서 언급한 이론식보다 큰 값을 나타내고 있는데, 이러한 원인은 교량 바닥판의 위치적 특성상 여타의 콘크리트 부재보다 염화물에 노출된 정도가 매우 크기 때문이라고 판단된다.

실험결과는 염소이온 확산계수가 시간의 경과에 따

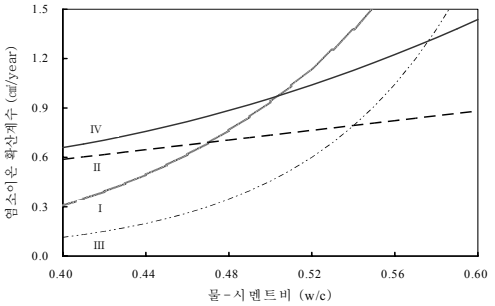


Fig. 5 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산계수

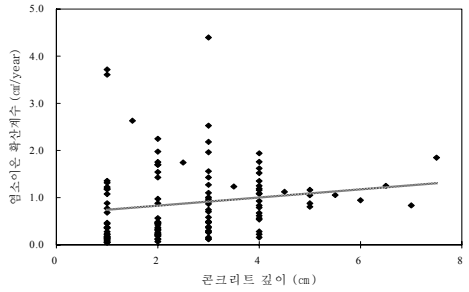


Fig. 6 깊이에 따른 염소이온 확산계수

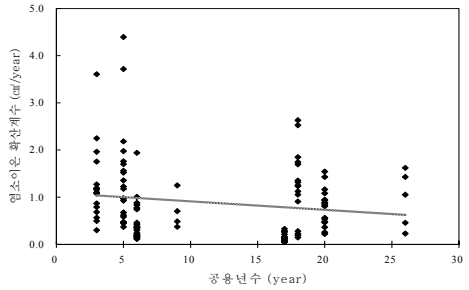


Fig. 7 공용년수에 따른 염소이온 확산계수

라 감소하는 경향과 유사하게 도출되었다. 그러나 본 연구에서는 총염화물량을 분석하여 얻은 염소이온 확산계수로써 실제 구조물에서 확산을 하는 수용성 염화물의 확산과는 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 7에서와 같이 수용성 염화물량이 작은 초기재령에서의 염화물 확산계수는 과대평가 되었다고 판단되며, 정확한 염소이온 확산계수 및 내구성 평가를 위해서는 향후 수용성 염화물과 총염화물량에 대한 실험과 분석이 이루어져야 할 것이다.

4. 염소이온 확산계수에 따른 교량 바닥판의 공용수명 평가

염소이온 확산계수 및 염해환경 노출정도에 따른 공용수명을 평가하기 위해 Fick의 제 2법칙을 이용하여 표면 염화물량(C_0)과 염소이온 확산계수(D_{Cl})의 특성을 분석하고 각각 Fig. 8과 9에 나타내었다. Fig. 8은 염해환경 노출정도는 보통이며 임계염화물량을 1.2kg/㎥(0.4%)로 가정하였을 경우의 염소이온 확산계수와 콘크리트 피복두께에 따른 콘크리트 구조물의 공용수명을 나타낸 것이다. Fig. 9는 바닥판과 교각 및 교대의 염소이온 확산계수를 가정하고 염해환경 노출정도(표면염화물량)와 콘크리트 피복두께에 따른 콘크리트 구조물의 공용수명을 나타낸 것이다. 여기서 바닥판의 점선은 물-시멘트비 45%인 경우의 염소이온 확산계수를 나타내며, 교각 및 교대의 실선은 물-시멘트비 50%인 경우의 염소이온 확산계수를 나타낸 것이다.

고속도로 교량의 평균 공용년수는 "고속도로지"를 참고하면 27.8년으로 약 30년 정도 사용하면 개축하는 것으로 나타났다. 또한 바닥판의 경우는 10년 정도 공용하면 손상이 시작되고 부분보수 및 바닥판 재타설을 실시한 것으로 나타났다.[(2)] 따라서 바닥판의 공용수명을 교량의 전체 공용수명과 어느 정도 일치시키려면 현재의 바닥판 피복두께 4cm를 조정할 필요가 있다. Fig. 3과 Fig. 8의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 바닥판의 공용수명을 30년 이상 사용하려면 현재의 4cm인 피복두께를 최소 8cm이상으로 조정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 '96년부터 '04년까지 실시한 고속도로 교량 147개소의 정밀안전진단보고서의 염화물 함유량에 대한 자료를 바탕으로 교량의 부재별, 주변환경에 따른 분석을 실시하였고 고속도로 교량 21개소의 바닥판 상부에서 채취한 42개의 콘크리트 코어를 일본콘크리트공학협회에서 규정한 실험방법에 의하여 산-가용성 염화물량(고정염화물량, 총염화물량)을 콘크리트 깊이에 따라 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

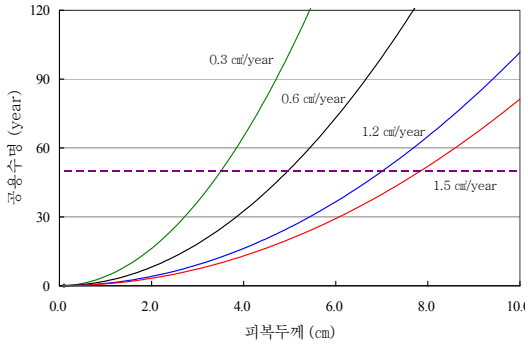


Fig. 8 염소이온 확산계수에 따른 수명평가

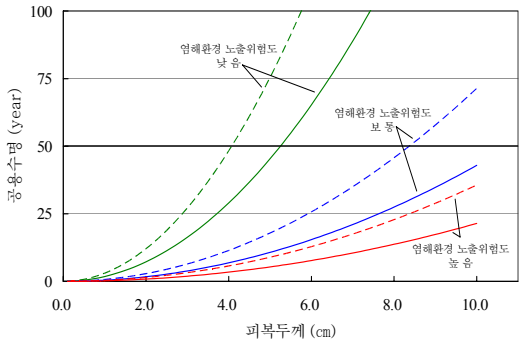


Fig. 9 염해환경 노출정도에 따른 수명평가

1) 고속도로 교량의 경우 주변환경에 따른 염화물 함유량은 거의 유사한 값을 나타내었으나 상대습도가 높고 건습이 반복되는 하천환경에서 약간 높은 염화물 함유량을 나타내는 것을 알 수 있었다.
2) 각부재의 평균 염화물 함유량을 조사한 결과, 교대와 거더에서 염화물 함유량이 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 특히 바닥판과 교대의 경우 몇몇 교량에서 높은 염화물 함유량이 나타났는데 이는 바닥판 상부의 균열과 신축이음부의 누수 등의 영향인 것으로 판단된다.
3) 고속도로 교량의 바닥판 염화물량을 분석한 결과 철근의 부식을 일으키는 임계염화물량인 1.2kg/㎥을 넘는 구조물이 많았으며, 공용년수에 따른 바닥판의 염화물량을 분석한 결과 공용 후 10년이 지나면서 염화물량이 급격히 증가하는 것으로 나타나 이에 대한 대책이 필요한 것으로 나타났다.

4) 염해환경 노출정도에 따른 바닥판의 수명평가 결과, 고속도로 교량의 평균 공용수명 30년 이상을 사용하려면 염해환경 노출위험도가 높은 경우 바닥판 피복두께는 최소 8cm이상이 되어야 하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 임홍범, 박창호, 신재인, "고속도로 교량의 중성화 현황 분석", 대한토목학회 학술발표회논문집, Vol-1, 2004, pp. 3674-3679.
2. 신재인, 박창호, 임홍범, 이상순, "철근콘크리트 바닥판의 예방적 유지관리", 고속도로지, 제69호, 2004, pp. 240-251.
3. 이창수, 윤인석 "콘크리트의 염소이온 확산거동 예측에 대한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제24권 1호, 2004, pp. 115-124.
4. 한국도로공사, "교량 예방적 유지관리 방안 연구", 2005.
5. 문한영, 김홍삼, 최두선 "콘크리트 종류별 모세관공극 특성과 전위차 염소이온 확산계수", 대한토목학회 논문집, 제23권 5호, 2003, pp. 969-976.
6. 이영재, 김용희, 이윤영 "동해안 39개 철도구조물의 염화물 함유량과 중성화에 대한 현황분석" 한국구조물진단학회 제7권 제1호, 2003, pp. 259-266.
7. 신재인, 박창호, 이병주, 임홍범, "고속도로 교량의 염소이온 확산특성과 공용수명 평가" 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제17권, 제2호, 2005, pp. 663-666.
8. Eric, J. Hansen and Victor E. Saouma, "Numerical Simulation of Reinforce Concrete Deterioration Part : Chloride Diffusion", ACI Material Journals, 1999, pp. 173-180

급행 (접수일자 : 2007년 5월 16일)