교량 방호벽의 염해 실태 분석 및 구조 안전성 평가

Analysis of Chloride Deterioration and Structural Safety Evaluation of Bridge Barriers

김국현* · 이주하**

Kim, Koog Hun*, and Lee, Joo Ha**

Abstract

Recently, there has been an increase in the chloride deterioration of bridges on urban highways owing to the excessive usage of deicing agents in winter, thus necessitating repair and maintenance measures to ensure the durability of concrete. In this study, the status of the damages occurring in the concrete barriers, such as walls and median partitions, of bridges on urban highways in Seoul was investigated. After collecting a total of 306 cores from various sites, a chloride analysis test was performed on a total of 918 samples obtained by dividing each core into three parts. The results were analyzed using the depth, upper and lower parts of the barrier, damage conditions, and route. In addition, the safety of the structure was evaluated in the case of repair by removing the corroded reinforcing bars (main reinforcing bars and spacers) directly exposed to chloride.

Key words : Concrete Barrier, Chloride, Rebar Corrosion, Durability, Maintenance

요 지

최근 동절기에 제설제 사용량 과다로 도시고속도로 상의 교량에 대한 염해가 증가하고 있어 내구성 확보를 위한 보수보강 및 유지관리 방안이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 서울시 도시고속도로 상 공용중인 교량의 콘크리트 방호울타리(방호벽 및 중앙분리대)에서 발생하고 있는 손상현황을 조사하였다. 이를 위해 여러 현장에서 총 306개의 코어를 채취 후 깊이별로 3등분하여 총 918개의 시료에 대해 염화물 분석 시험을 수행하였다. 시험결과는 방호벽의 깊이, 상부 및 하부, 손상상태, 노선별로 분류하여 분석하였다. 이에 더하여 직접적인 염해에 노출된 철근(주철근, 간격재)을 제거하여 보수하는 경우에 대한 구조물의 안전성을 평가하였다.

핵심용어 : 콘크리트 방호울타리, 염화물, 철근부식, 내구성, 유지관리

1. 서 론

서울시의 강변북로나 올림픽대로와 같은 도시고속도로에는 교량 및 터널 등과 같은 도로시설물이 있으며, 다량 살포된 제설제로 인한 염화물은 직접 또는 간접적인 방법으로 도로시설물에 영향을 미치고 있다. 특히, 다양한 도로시설물 가운데 교량시설물은 제설에 대한 선제적인 대응이 필요한 시설물이며, 교량에 유입된 제설제가 배출되는 과정에 따라 여러 위치에서 심각한 손상사례들이 발생하고 있는

실정이다. 교량에 유입된 제설제가 가장 먼저 침투하거나 영향을 미치는 콘크리트 부재는 도로면에 보호층 없이 가장 인접해 있는 방호벽과 중앙분리대라 할 수 있다. 이들 부재는 제설차량에 의해 염화물이 직접적으로 살포되기도 하지만, 통행차량에 의해 비산되어 염해를 가중시키고 있다.

도시고속도로상 방호벽 및 중앙분리대와 같은 시설물도 해안에 위치한 시설물과 유사하게 제설제 사용에 의해 염화물 이온이 콘크리트 내부로 침투하는 것을 예측하고, 콘크리트 방호벽의 손상 지연 및 체계적 보수를 위한 연구가 필요하

*정회원, 서울시시설공단 도로관리처장(E-mail: gh912@sisul.or.kr)

Member, Director of Road Management, Seoul Facilities Corporation

**교신저자, 정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 부교수(Tel: +82-31-220-2159, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: leejooaha@suwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Suwon

다. 일반적으로 철근 부식에 근거한 콘크리트 구조물의 사용 수명 평가는 부식 개시 시기까지 보는 방법과 부식개시 시기와 부식 진행 시기의 합으로 보는 방법이 있다. 콘크리트에 침투하는 염화물 이온 확산 등을 규명하는 이론은 Fick의 제1법칙 및 제2법칙을 기반으로 철근이 부식하는 시기 등을 분석하는 잔존수명 평가와 같은 선행연구가 국·내외에 연구되어 왔으며, 다양한 해석프로그램도 개발되어 사용수명 예측에 활용되고 있는 실정이다(Yang et al., 2008; Lee et al., 2010; Kwon and Park, 2013; Na and Lee, 2014; Justnes et al., 2016; Balestra et al., 2021; Cadenazzi et al., 2021).

염화물에 의한 철근부식에 관한 국외의 연구 중 Tuutti (1982)의 모델은 부식개시 시기를 분석하는 단순한 방법 중 하나이며, 염소이온 확산계수와 초기 기간 피복두께 영향 등을 연구하였다. Browne (1982)은 Tuutti 모델에서 염화물 이온농도와 확산계수가 시간에 대해 일정하다고 가정하여 부식발생 시점을 예측하였다. 미국콘크리트학회(ACI Committee 365, 2017)는 표면염화물량과 염화물이온 확산계수가 상수라는 조건으로 시간 및 공간상의 염화물이온농도 프로파일을 구할 수 있다고 제시하였다. 이들 모델은 목표 수명이 정해지고 그 기간 동안 성능을 유지할 수 있는 기법을 해석적으로 제시하는 결정론적 설계에 활용되며, 목표 수명동안 철근 위치에서 유입된 염화물량이 부식을 야기하는 임계 염화물량보다 낮게 유지하는 개념이다. 이들 결정론적 방법은 물리적, 통계적 불확실성을 내포하며, 대체로 염화물 이온의 침투가 과도하게 평가되는 경향이 있다. 1990년대 후반부터 DuraCrete (2000) 모델과 같이 확률 개념을 이용한 철근부식 개시시기를 예측하는 방법도 연구되어 왔다. DuraCrete (2000) 모델은 입력 변수를 적절하게 선정할 경우 상당히 합리적인 결과를 나타낼 수 있으나 다소 과소평가되기도 한다.

국내의 경우 한국콘크리트학회(KCI, 2010)에서 실제구조물의 염화물 데이터에 의한 확산계수 및 문헌결과를 종합한 실무지침을 제시하였으며, 한국건설기술연구원(KICT, 2001)은 수화반응 모델 및 미세공극구조 모델을 기반으로 재령변화 및 환경조건 변화를 고려한 모델을 제시하여 장기간 실측자료가 없는 한계점에 대한 대안연구를 시행하였다. Lee et al. (2015)은 지역 고속도로상 제설제로 인해 콘크리트가 염해와 동결융해 환경에 직접적으로 노출되는 점을 감안하여, 해수조건의 콘크리트 대비 염화물 농도와 확산계수에 대한 비교 연구를 시행하였다. 또한, Kim et al. (2019)은 제설제가 사용되는 도로 구조물에서 동결융해와 제설제에 의한 염해가 복합하여 열화를 촉진하는 것에 대해 배합설계 및 시공 상 필요한 조치를 제시하였다.

본 연구에서는 서울시 도시고속도로 상 교량의 콘크리트 방호벽 및 중앙분리대에 대해 잔존염화물 실태를 조사하였다. 여러 현장에서 채취한 코어 시료에 대해 염화물 분석 시험을 수행하여 방호벽의 깊이, 상부 및 하부, 손상상태,

노선별로 분류하여 분석하였다. 이에 더하여 염해에 노출된 철근의 제거 또는 부분 교체 등을 통한 보수 후 구조물의 안전성을 평가하였다.

2. 염화물 현장조사 및 분석

방호울타리(방호벽 및 중앙분리대)에 대하여 제설제 살포에 따른 염화물 이온의 침투 영향을 조사하기 위한 대상 현장은 Fig. 1에 나타나 있다. 시료는 건전부 90개소와 손상부 216개소로 구분되어 총 306개소(방호벽 202개소, 중앙분리대 104개소)에서 코어채취($\Phi 35$ mm, $L = 60$ mm)를 하였다. 코어채취를 통해 취득된 콘크리트 시료는 3등분(20 mm 간격)하여 Fig. 2와 같은 염화물 분석절차 및 분석기준(KS F 2714, 2017)에 따라 품질검사 전문기관에서 염화물 이온 분석을 수행하였다. 염화물 분석은 채취된 코어의 깊이별(3 지점), 방호벽 위치별(상부, 하부), 손상 상태별(손상부, 건전부), 노선별 등으로 구분하여 수행되었다. Table 1에는 염화물 상태평가 기준을 나타내었다(KISC, 2012).

2.1 깊이 및 위치별(상, 하부) 염화물 분석

방호벽의 깊이별 및 위치(상, 하부) 염화물 분석은 Fig. 3과 같이 306개의 코어를 3개의 심도(10 mm, 30 mm, 50 mm)와 방호벽의 상부 및 하부로 구분하여 분석을 수행하였다.

Table 2는 코어 시편의 염화물 함량 분석 결과에 따라 Table 1의 염화물 상태평가 기준으로 a-d 등급으로 분류하여 각 등급별로 해당하는 코어 개수를 나타낸 것이다. 심도가 깊어질수록 염화물 함량 상태평가 a등급의 비율은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면 c, d 등급의 비율은 깊이에 따라 감소하는 경향을 나타낼 수 있다. 염화물함량 상태평가 c, d등급(부식 가능성이 높은 상태) 비율은 심도 10 mm에서 41.1%, 30 mm에서 31.4%, 50 mm에서 22.8%로 심도가 깊어질수록 감소하며, 최소 피복두께 근처에서 부식 가능성의 비율은 31.4%로, 한국도로공사에서 조사한 강원도 고속도로의 조사값(32%)과 비슷한 정도의 수치이다(Kim et al., 2019). 철근 부식이 발생하는 상태인 d등급은 심도 10 mm에서 22.5%, 30 mm에서 13.4%, 50 mm에서 6.5%의 비율로 평가되었다. 따라서 Fig. 4에서 보는 바와 같이, 심도가 깊을수록 부식 가능성 및 철근부식 발생비율이 낮아진다고 볼 수 있다.

방호벽의 위치(상, 하부)별 염화물에 따른 상태평가 분석 결과는 Tables 3, 4와 같으며 총 306개의 코어 중 상부 및 하부에 해당하는 코어는 각각 153개로 동일하다. 방호벽의 상부는 철근과 제일 가까운 깊이 50 mm 기준으로 3.3%가 c, d등급에 해당되어 염화물로 인한 철근의 부식우려가 현저히 낮은 것으로 분석되었다. 반면에 하부는 상부와 동일한 50 mm 깊이를 기준 c, d등급이 42.5%로 철근의 부식우려가 현저히 높아짐을 알 수 있다. 따라서 방호벽의 염화물에

Fig. 1. Chloride Test Core Collection on Urban Highway Bridges in Seoul

Fig. 2. Standard Test and Analysis Procedure for Chloride in Concrete

Table 1. Chloride Condition Evaluation Standard (KISC, 2012)

Grade	Chloride content (kg/m ³)	Corrosion potential
a	Chloride ≤ 0.3	No risk of corrosion
b	0.3 < Chloride < 1.2	Low chance of corrosion
c	1.2 ≤ Chloride ≤ 2.5	High probability of corrosion
d	Chloride > 2.5	Corrosion of rebar

Fig. 3. Core Samples for Chloride Analysis

Table 2. Chloride Condition Grade by Barrier Depth

Grade	Depth 10 mm	Depth 30 mm	Depth 50 mm
a	45 (14.7%)*	77 (25.2%)	117 (38.2%)
b	135 (44.1%)	133 (43.5%)	119 (38.9%)
c	57 (18.6%)	55 (18.0%)	50 (16.3%)
d	69 (22.5%)	41 (13.4%)	20 (6.5%)

*number of cores (percentage of total number)

Fig. 4. Chloride Distribution by Depth**Table 3.** Chloride Condition Grade of Upper Barrier

Grade	Depth 10 mm	Depth 30 mm	Depth 50 mm
a	44 (28.8%)*	74 (48.3%)	108 (71.2%)
b	96 (62.7%)	70 (45.8%)	40 (25.5%)
c	7 (4.6%)	7 (4.6%)	3 (2.0%)
d	6 (3.9%)	2 (1.3%)	2 (1.3%)

*number of cores (percentage of total number)

Table 4. Chloride Condition Grade of Lower Barrier

Grade	Depth 10 mm	Depth 30 mm	Depth 50 mm
a	1 (0.6%)*	3 (1.9%)	9 (5.9%)
b	39 (25.5%)	63 (41.2%)	79 (51.6%)
c	50 (32.7%)	48 (31.4%)	47 (30.7%)
d	63 (41.2%)	39 (25.5%)	18 (11.8%)

*number of cores (percentage of total number)

대한 유지관리 착안 위치는 상부보다 하부로 분석되었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 상부가 하부에 비해 염화물 침투 기울기가 완만함을 알 수 있다.

2.2 손상 상태별(건전부, 손상부) 염화물 분석

방호벽의 손상 상태별 염화물 분석은 방호벽 상부-건전부, 방호벽 상부-손상부, 방호벽 하부-건전부, 방호벽 하부-손상부의 4가지 형태로 그룹화하여 분석을 시행하였다. Table

(a) Upper barrier **(b) Lower barrier****Fig. 5.** Chloride Distribution by Location**Table 5.** Condition Rating Criteria (KISC, 2012)

Grade	Criteria Condition
A	• Good
B	• Minor damage • 0.3 mm or less crack
C	• 0.3 mm or more crack • Less than 10% of delamination, damage, and rebar exposure • Rebar corrosion length less than 2%
D	• 10% or more of delamination, damage, and rebar exposure • Rebar corrosion length of 2% or more

5의 KISC (2012)에서 제시한 상태평가 등급기준에 따라 A, B 등급은 건전부, C, D 등급은 손상부로 구분하였다. 상부와 하부 각각 153개 코어 모두 동일하게 건전부에서 채취한 코어는 45개, 손상부는 108개이다.

Table 6과 Fig. 6에 손상 상태별 염화물 함량 분석 결과를 나타내었다. 방호벽 상부의 경우, 건전부 및 손상부 모두에서 염화물 침투는 경미한 수준(0%~12.1% 이내)으로 나타나 염화물에 의한 피해 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 따라서 방호벽의 상부보다는 하부를 중심으로 염화물에 대한 손상방지 대책을 세울 필요성이 있다.

방호벽 하부 건전부는 부식가능성이 낮은 상태(a, b등급)

Table 6. Chloride Condition Grade by Damage Condition

Grade	Group 1: Upper Barrier (healthy)				Grade	Group 2: Upper Barrier (damaged)			
	Depth 10 mm	Depth 30 mm	Depth 50 mm	Total		Depth 10 mm	Depth 30 mm	Depth 50 mm	Total
a	24 (53.3%)*	28 (62.2%)	39 (86.7%)	91 (67.4%)	a	20 (18.5%)	56 (42.6%)	69 (63.9%)	135 (41.7%)
b	21 (46.7%)	17 (37.8%)	6 (13.3%)	44 (32.6%)	b	75 (69.4%)	53 (49.1%)	34 (31.5%)	162 (50.0%)
c	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	c	7 (6.5%)	7 (6.5%)	3 (2.8%)	17 (5.2%)
d	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	d	6 (5.6%)	2 (1.9%)	2 (1.9%)	10 (3.1%)
Grade	Group 3: Lower Barrier (healthy)				Grade	Group 4: Lower Barrier (damaged)			
	Depth 10 mm	Depth 30 mm	Depth 50 mm	Total		Depth 10 mm	Depth 30 mm	Depth 50 mm	Total
a	0 (0%)	2 (4.4%)	6 (5.9%)	8 (5.9%)	a	1 (0.9%)	1 (0.9%)	3 (2.8%)	5 (1.5%)
b	18 (40.0%)	23 (51.1%)	25 (48.9%)	66 (48.9%)	b	21 (19.4%)	40 (37.0%)	54 (50.0%)	115 (35.5%)
c	14 (31.1%)	9 (20.0%)	8 (23.0%)	31 (23.0%)	c	36 (33.3%)	39 (36.1%)	39 (36.1%)	114 (35.2%)
d	13 (28.9%)	11 (24.4%)	6 (22.2%)	30 (22.2%)	d	50 (46.3%)	28 (25.9%)	12 (11.1%)	90 (27.8%)

*number of cores (percentage of total number)

(a) Upper Barrier (healthy)

(b) Upper Barrier (damaged)

(c) Lower Barrier (healthy)

(d) Lower Barrier (damaged)

Fig. 6. Chloride Distribution by Damage Condition

의 전체 비율(54.8%)이 하부 손상부(37.0%)보다 높게 분석되어 염해로 인한 철근 부식의 안전도가 상대적으로 높은 것으로 보인다. 하지만 임계 염화물함량(1.2 kg/m^3)의 경계 지점인 b, c등급이 다수 분포하므로 유지보수가 미흡할 경우 대규모 부식 발생 가능성이 높은 상태(c, d등급)로 변화할 우려가 있다. 따라서, 방호벽의 하부는 손상여부에 상관없이 예방적인 유지관리에 관한 검토가 필요하다. 하부 손상부는 피복두께 30 mm 이상까지 부식가능성이 높은 상태(c, d등급)의 비율이 50% 이상이므로, 해당 부위의 단면보수 시 30 mm 이상의 충분한 치핑을 시행하여야 잔류 염화물로 인한 철근

부식 및 보수부 하자발생을 최소화 할 수 있을 것으로 분석되었다.

2.3 도시고속도로 노선별 염화물 분석

Table 7에 서울시 도시고속도로 노선별로 방호벽의 철근 피복두께 인접부(심도 30 mm)에 대한 염화물 상태평가 결과를 비율로 나타내었다. 염화물함량에 따른 상태 등급은 평균적으로 a등급 21.3%, b등급 45.9%, c등급 16.4%, d등급 16.4%의 분포를 나타내었다. 특히, ‘북부간선로’와 ‘고속국도1호선’ 2개 노선에서 철근부식 우려 상태(c, d등급)가 40%

Table 7. Chloride Condition Grade by Route

Grade	Naebu Expwy	Bukbu Expwy	Route 1 Expwy	Gangbyeon Expwy	Dongbu B Expwy	Olympic Expwy	Avg.
a	24.1*	25.0	0.0	33.8	25.0	20.0	21.3
b	45.5	30.8	37.5	37.9	63.9	60.0	45.9
c	15.2	17.3	25.0	25.4	5.6	10.0	16.4
d	15.2	26.9	37.5	2.9	5.6	10.0	16.4

*unit : %

Table 8. Structural Analysis Conditions

Sound proof-Wall	Unit weight (kN/m ²)	Height (m)	Sectional dimension (mm)	Spacing (m)	Wind (kN/m ²)
	0.3	3~4	H150*150*7*10	2.0	1.10
Barrier	Concrete specified compressive strength f_{ck} (MPa)		Rebar yield strength f_y (MPa)	Allowable stress	
				Concrete (MPa)	Rebar (MPa)
	21		300	8.4	150

Fig. 7. Cross Section of Barrier for Structural Analysis

이상으로 높게 나타났다. 또한, 염화물이 방호벽에 침투한 특성분석 결과 방호벽의 하부에서 임계염화물함량을 초과하는 구간이 다수 확인되었다. 이는 방호벽 하부 손상부는 동결융해 등 다양한 요인으로 인해 콘크리트 박리와 손상 등 열화가 발생한 상태에서 추가적인 염화물 침투가 더욱 손쉽게 가속화되는 것으로 볼 수 있다.

3. 염화물 열화 방호벽의 안전성 검토

염화물 열화로 인한 기존 방호벽 보수 시 안전성을 검토하기 위해서 구조계산을 실시하였다. 주요 검토 변수로써 부식 노출된 철근의 제거 또는 부분교체에 대해 검토하였으며, 방호벽 상부에 방음벽을 설치할 경우 방음벽 설치 높이별

안전성을 검토하였다. Table 8에 방음벽 및 방호벽의 구조 검토 조건이 나타나 있다. Fig 7은 구조계산에 사용된 방음벽이 설치된 방호벽의 대표 단면을 나타내고 있다.

구조계산을 통한 방호벽 안전성 검토 결과는 Table 9와 같다. 방호벽 구조검토 결과, 방호벽 상부에 높이 3.0 m~4.0 m 범위의 방음벽 설치시 안전한 것으로 분석되었다. 기존 방호벽 보수를 위해 노출된 철근의 제거 또는 부분교체 시에는 방음벽 연장 방향 1 m당 1개의 철근을 제거 또는 부분 교체할 시에는 안전성이 확보되는 것으로 검토되었다. 단, 이 결과는 신규 설치를 기준으로 한 결과이므로 노후화가 경과된 구조물에 대해서는 각 재료의 강도 감소 정도를 감안한 판단이 필요하다.

Table 9. Structural Analysis Result for Barrier Safety

Dimension	Rebar type	Rebar removal (Repair case)	Replacement rebar	Flexural strength check for partial replacement of rebar		Reinforcement ratio check for rebar removal
				ϕM_n (kN · m)	M_u (kN · m)	
H = 3.0 m B = 0.30	D16@125	1 EA/m	D16@250	75.625	45.242	O.K
		2 EA/m	D16@333	57.039	45.242	N.G (insufficient reinforcement ratio)
H = 3.0 m B = 0.25	D16@125	1 EA/m	D16@250	75.625	45.242	O.K
		2 EA/m	D16@333	57.029	45.242	N.G (insufficient reinforcement ratio)
H = 4.0 m B = 0.30	D16@125	1 EA/m	D16@250	75.629	51.446	O.K
		2 EA/m	D16@333	57.029	51.446	N.G (insufficient reinforcement ratio)

4. 결 론

본 연구에서는 서울시 도시고속도로 교량의 중앙분리대 및 방호벽의 염화물 열화 현상을 현장에서 채취한 918개(코어 306개)의 시료를 통해 조사 및 분석하고, 염해를 입은 방호벽의 보수시 구조적 안전성에 대해 평가하였다. 이를 통해 얻은 결론들은 다음과 같다.

- 1) 전체 시료 918개를 방호벽 깊이별로 염화물 분석한 결과, 표면부로부터 심도가 깊어질수록 염화물 함량에 따른 상태평가 중 부식우려가 없는 a등급이 증가하였다. 반면에 부식 가능성이 높은 상태인 c, d등급의 비율은 심도 10 mm, 30 mm, 50 mm에서 각각 41.1%, 31.4%, 22.8%로 표면부에 가까울수록 염해가 심한 것으로 나타났다.
- 2) 방호벽 위치별(상부, 하부) 분석 결과, 방호벽 상부는 염화물함량 상태평가 c, d등급이 모든 심도에서 8.5% 이하에 불과했으나, 하부는 심도 10 mm, 30 mm, 50 mm에서 각각 73.9%, 56.9%, 42.5%가 c, d등급에 속해 하부에 집중적으로 염화물 피해가 발생하고 있는 것으로 분석되었다.
- 3) 손상상태별 분석 결과, 외관조사 상태평가 손상부에서 건전부에 비해 염화물함량이 높게 나타나 방호벽의 손상은 염해가 직접적으로 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 하부 손상부는 피복두께 이상에서 부식가능성이 높은 상태(c, d등급)의 비율이 50% 이상이므로 해당 부위의 단면보수 시 30 mm 이상의 충분한 치핑을 시행하여야 잔류 염화물로 인한 철근부식 및 보수부 하자발생을 최소화할 수 있다.
- 4) 염해를 입은 방호벽에 대해 노출된 철근의 제거 또는 부분교체 등의 보수시 구조적 안전성을 검토한 결과, 방음벽 연장 방향 1 m당 1개의 철근을 제거 또는 부분 교체할 시에는 안전성이 확보되는 것으로 검토되었다.

- 5) 서울시 도시고속도로 교량의 방호울타리(방호벽 및 중앙분리대) 염화물 분석 결과, 전반적으로 임계 염화물함량(1.2 kg/m^3)의 경계지점인 b, c등급이 다수 분포하므로 예방적 유지관리 검토가 필요하다. 특히, 방호벽 하부를 중심으로 표면에서부터 심도 30 mm를 포함한 범위에 대한 염화물 손상방지 대책을 세울 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(20CTAP-C157478-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- ACI Committee 365. (2017). *ACI PRC-365.1-17: Report on service life prediction*, the American Concrete Institute, MI, USA.
- Balestra, C.E.T., Reichert, T.A., Vizzotto, A.L.P., Pansera, W.A., and Savaris, G. (2021). General model for service life analysis of reinforced concrete structures subject to chloride penetration. *Construction and Building Materials*, Vol. 305, 124727.
- Browne, R.D. (1982). Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environment. *Durability of Building Materials*, No. 1, pp. 113-125.
- Cadenazzi, T., Lee, H., Suraneni, P., Nolan, S., and Nanni, A. (2021). Evaluation of probabilistic and deterministic life-cycle cost analyses for concrete bridges exposed to chlorides. *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 4, 100247.
- DuraCrete. (2000). Final technical report-probabilistic

- performance based durability design of concrete structures. *Document BE95-1347/R17*, European Brite-Euram, Gouda, Netherlands.
- Justnes, H., Kim, M.O., Ng, S., and Qian, X. (2016). Methodology of calculating required chloride diffusion coefficient for intended service life as function of concrete cover in reinforced marine structures. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 73, pp. 316-323.
- Korea Concrete Institute (KCI). (2010). *MCP-Durability and design for chloride deterioration of marine concrete*, Korea Concrete Institute.
- Korea Institute of Civil engineering and building Technology (KICT). (2001). *Research report-development of durability assessment technology of concrete bridges for salt-attack*. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.
- Kim, H.S., Kim, K.H., Choi, H.H., Kim, J.C., Kim, J.N., and Yoo, H.J. (2019). *Research report-A study on the detailed design guides of durability for bridge members under de-icing salts environments*. Korea Expressway Corporation Research Institute.
- Korea Infrastructure Safety Corporation (KISC). (2012). *Safety inspection and precision safety inspection detailed guideline (bridges)*. Korea Infrastructure Safety Corporation.
- KS F 2714. (2017). *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*. Korean Standards Association.
- Kwon, S.J., and Park, S.G. (2013). Analysis technique for chloride penetration in high performance concrete behavior considering time-dependent accelerated chloride diffusivity. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 2, pp. 145-153.
- Lee, C.S., Park, J.H., and Kim, Y.O. (2010). Service life prediction of R.C. structures considering chloride binding. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 1, pp. 15-22.
- Lee, H.N., Jeon, C.K., Kim, J.H., Shim, J.Y., and Jeon, I.K. (2015). Estimation of service life for expressway bridge subjected to chloride ingress from de-icer. *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 4, pp. 548-555.
- Na, O.P., and Lee, J.S. (2014). Prediction of chloride penetration into concrete pavement under deicing chemicals. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 2, pp. 77-84.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete-CBI research report 4:82*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- Yang, E.I., Kim, M.Y., and Park, H.G. (2008). Field investigation of chloride penetration and evaluation of corrosion characteristics for deicer. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 6, pp. 47-52.

Received	October 26, 2021
Revised	October 27, 2021
Accepted	November 3, 2021