

해양 환경하 콘크리트 교량의 염해환경 성능평가 연구

채원규 · 이명구** · 손영현** · 홍성욱***

신구대학교 토목과 · *을지대학교 보건환경안전학과 · **에스알기술(주) · ***한림성심대학교 토목과
(2018. 4. 25. 접수 / 2018. 6. 26. 수정 / 2018. 10. 5. 채택)

A Study on the Evaluation of the Environmental Performance of Salt Damage in Concrete Bridges under Marine Environment

Won-Kyu Chai · Myeong-Gu Lee** · Young-Hyun Son** · Sung-Wook Hong***

Department of Civil Engineering, Shingu University

*Department of Environmental Health and Safety, Eulji University

**SR Tech, Co. Ltd

***Department of Civil Engineering, Hallym Polytechnic University

(Received April 25, 2018 / Revised June 26, 2018 / Accepted October 5, 2018)

Abstract : This study aims to investigate in the assessment of salt damage conditions in concrete structures under marine environment conditions. It aims also to improve the durability of new concrete bridge through applying the life prediction method of salt damaged bridges. As measuring chloride contents of these bridges on the southwest coastal area, it is shown that the average amount of chloride on these surfaces close to shore is 10.5 kg/m³. This figure is much higher than that of the Standard Specification for Concrete(1.5 kg/m³~2.5 kg/m³). In contrast, it is shown the average amount of chloride on these surfaces in tide zone is 13.1 kg/m³. Its figure is much lower than that of the Standard Specification for Concrete(20 kg/m³). And the life of bridges is estimated about 17 years. To improve the durability for salt damage, these bridges are applied to surface treatment method which the replacement rate of furnace slag is 60%. Under this condition, it is expected to be 110 years. Consequently, it is clear that the use of slag replacement rate, surface treatment agent, and anti-corrosion agent to control chloride penetration effects of a submerge-based concrete bridge will be required.

Key Words : salt damage, surface chloride contents, life prediction, furnace slag

1. 서론

1.1. 연구배경

콘크리트표준시방서 제17장(해양콘크리트)에서는 해양 환경하의 콘크리트 교량은 해양 콘크리트로 취급하여야 하며, 해양 콘크리트는 해안선으로부터 250m 이내의 육상 지역에 위치한 콘크리트 구조물은 염해를 받기 쉬우므로 해안으로부터 거리에 따라 구분하여 내구성 향상 대책을 수립하여야 한다고 하고 해양 콘크리트 구조물은 염해를 받기 쉬운 환경에 노출되어 있으므로 콘크리트 열화 및 강재 부식에 의해 그 기능이 손상되지 않도록 하여야 하며, 장기 내구성을 요하는 중요한 구조물의 경우 콘크리트의 성능저하 방지와 강재 부식을 방지할 수 있는 추가적인 조치를 취하여야

한다고 규정하고 있다. 특히 열악한 환경하에 노출된 콘크리트 구조물은 내구성명이 크게 단축되는데, 이는 해안지역의 가혹한 환경조건으로 인한 염화물 이온 침투 및 탄산화 등에 의한 철근부식 등이 내구성 저하에 큰 요인으로 작용된다고 보고되고 있다¹⁾.

따라서 해양 환경하에 설치되는 신설 콘크리트 교량의 내구성을 향상시키기 위해서는 신설 교량 설치지역에 위치하는 기존 콘크리트 구조물의 염해 현상에 대한 규명이 선행되어야 하며, 이에 대한 대책을 강구함으로써 신설 구조물의 안전성 및 경제성을 확보할 수 있다.

1.2. 연구목적

해양 환경하에서는 해수, 해수만 또는 대기 중에 포함된 염화물이 여러 가지 방법으로 콘크리트에 침투되며,

* Corresponding Author : Myeong-Gu Lee, Tel : +82-31-740-7215, E-mail : lmg@eulji.ac.kr

Department of Environmental Health & Safety, Eulji University, 553 Sanseong-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13135, Korea

콘크리트 내부에 매립된 철근은 침투된 염화물이온으로 인해서 조기에 부식이 진행될 가능성이 매우 높다. 철근의 부식이 진행되면 철근의 체적이 팽창하게 되고 이 팽창압으로 인해서 콘크리트에 균열이 발생되며, 이 균열을 통하여 염화물이 콘크리트 내부로 쉽게 침투하게 되며, 또한 이 균열을 통해서 수분이나 산소가 지속적으로 침투되기 때문에 철근은 더욱 빠른 속도로 부식이 진행되는 메카니즘을 형성하게 된다.²⁾ 이러한 철근부식 이외에 동결융해작용, 건습의 반복, 화학적 침식, 탄산화 등의 영향을 동시에 받게 되면 상승효과가 발생하게 되어 콘크리트의 성능저하는 더욱 빠르게 나타나게 된다. 따라서 해안지역에 위치한 기존 콘크리트 구조물의 염해 현상의 규명은 신설되는 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위해 무엇보다도 중요하다.

이에 본 연구에서는 해양 환경하에 있는 콘크리트 구조물의 염해 환경 평가에 대해 알아보고, 신설 콘크리트 교량 구조물에 대해 구조부재별 염해에 따른 수명 예측 적용사례를 통해 해양 환경하에 있는 신설 콘크리트 교량 구조물의 설계시 내구성 증진 방안을 제시하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 염해환경하의 내구성 설계에 대한 기존연구 및 기준

2.1. 교량의 염해환경 분석에 대한 기존연구

김동백 등은 철근콘크리트 구조물의 염해에 의한 사용수명 예측에 관한 연구에서 염해를 받는 철근콘크리트 구조물의 합리적인 사용수명 예측을 위해 다양한 내구성 설계방안을 비교·검토하였으며, Fick의 확산법칙을 이용하여 서로 다른 표면염소이온 농도 및 염소이온 확산계수값에 따른 염소이온 프로파일 해석을 수행하였다. 검토 결과 Fick의 확산방정식을 이용하여 직접적으로 염소이온 침투해석을 수행한 경우 내수한계 기간에 기초한 내구성설계(안)에 의해 요구되는 피복두께보다 다소 크게 나타나고 이 경우 염소이온 확산계수 등에 따라 사용수명을 확보하기 위해 요구되는 철근의 피복두께가 많은 차이를 보인다고 고찰하였다³⁾. 본 연구에서는 김동백 등의 기존연구³⁾에서 고찰하고 있는 사용수명을 확보하기 위해 피복두께의 변화를 가져야한다는 고찰에서 더 나아가, 해양 환경하의 철근콘크리트 교량의 주요 부재에 대한 설계수명 100년을 확보하기 위한 피복두께를 산정하였다. 본 연구에서는 이를 위해 염해수명 10년, 30년, 50년, 70년, 100년에 대한 피복두께와 염화물함유량과의 상관관계에 도출하여 한계염화물 혼입량을 만족하는 피복두께를 산정하였다.

권기준 등은 염해환경 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석 연구에서 해양 환경 등의 열악한 조건하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 내구성 해석 및 설계를 확률론적 이론에 근거하여 수행하는 합리적인 방법을 제안하였으며, 국내 측정자료에 대한 확률론적 해석 결과에 따르면 현행 시방서 규정은 100년 사용 후 각 위치에 따라 다양한 편차의 내구성 파괴확률을 보이는 것으로 나타나 각 위치별로 균일한 내구성 안전도를 확보하기 위한 연구가 필요하다고 고찰 하였다⁴⁾. 본 연구에서는 권기준 등의 기존연구⁴⁾에서 기술하고 있는 염해환경 콘크리트 구조물의 철근덮개는 각 위치별로 내구성과 안전도를 확보하기 위한 연구가 필요하다는데 기초하여, 해양 환경하의 철근콘크리트 교량의 주요 부재별로 적합한 배합설계를 하고 이에 대한 설계수명 100년을 확보하기 위한 피복두께를 설정하였다. 본 연구에서는 이를 위하여 배합설계 시 혼합시멘트의 사용하는 경우, 방청제와 표면처리제를 사용한 경우 등에 대한 설계수명을 예측하였다.

한편 채원규 등은 콘크리트 구조물의 염해도장을 통한 내구성 향상 및 경제적 효과분석 연구에서 콘크리트 구조물의 시공 단계에서 예방 유지관리적 차원의 염해도장을 실시하는 경우와 실시하지 않는 경우에 대한 내구성 상세평가를 통해 그 효과를 분석하고, LCC 분석을 통해 염해도장의 경제적 효과를 고찰하였으며, 연구 결과 염해도장을 한 경우 무도장에 비해 최초 단면보수 시기가 약 2.7배 증가하여 장기적인 유지관리 측면에서 염해도장을 실시하는 것이 유리하고 무도장에 비해 LCC가 60% 수준으로 높은 경제성을 갖는 것으로 평가하였다.⁵⁾ 본 연구에서는 채원규 등의 기존연구⁵⁾의 염해도장을 실시하는 것이 경제성이 있다는 평가결과에서 더 나아가, 해양 환경하의 철근콘크리트 교량의 주요 부재에 대한 염해수명 산정 시 방청제와 표면처리제를 사용한 경우에 대한 배합설계도 포함하여 염해수명을 산출하였다.

정지승 등은 염화칼슘이 함유된 제설제로 인한 콘크리트 바닥판 단부의 염해에 관한 사례 연구에서 정밀안전진단시 해안구조물에 대해서는 염화물조사를 반드시 수행하며 내륙지역의 콘크리트 구조물에 대해서는 염화물조사를 실시하지 않는 경우가 다수 존재하지만 내륙지역에서도 제설제로 인한 염화물 손상이 발생할 수 있으므로 정밀안전진단 항목에 염화물 시험을 포함할 것을 제안하였다⁶⁾. 정지승 등의 기존연구⁶⁾는 염해의 영향을 직접 받지 않는 내륙지방의 철근콘크리트 교량의 경우에도 제설제에 함유된 염화물이 콘크리트를 손상시킬 수 있다고 고찰한 것에 반해, 본 연구는 염해의 영향을 받고 있는

해양 환경하의 철근콘크리트 교량에 대한 염해수명 산정에 대한 논문으로 차별성을 갖고 있다.

채원규 등은 해양 환경하 콘크리트 교량의 탄산화 내구성 평가 인자 도출을 위한 현장조사 연구에서 서남해 지역에 대한 현장조사결과로부터 평균 탄산화 속도계수를 산출하고 예측 탄산화 깊이 식을 제시하였으며, 염해환경하에서의 탄산화 작용에 따른 철근 부식 개시 깊이를 고려한 피복두께를 고찰하였다⁷⁾. 본 연구는 채원규 등의 기존연구⁷⁾에서 고찰한 해양 환경하의 콘크리트 교량에 대한 피복두께에 따른 탄산화 깊이 산정과는 달리, 해양 환경하의 철근콘크리트 교량의 주요 부재에 대한 설계수명 100년을 확보하기 위한 피복두께를 산정한 것에서 차별성을 갖고 있다.

한편 한국건설기술연구원의 콘크리트 교량의 염해 내구성 평가 기술 개발 연구보고서에서는 비래염분 및 해사 사용 콘크리트에 대해 실내실험 및 현장실험 결과 비래염분 포집기 성능 실험 장치를 개발하였고, 해사 사용 장기 재령 시험체는 향후 철근의 부식속도 평가 및 시험체의 파괴조사, 염화물량 조사, 중성화 조사 등의 시험을 거쳐 비파괴시험 결과와 비교·검토가 필요한 것으로 판단된다고 고찰하였다⁸⁾. 본 연구는 한국건설기술연구원의 기존연구⁸⁾에서 중점적으로 연구한 비래염분에 대한 영향을 설계단계에서 적용하기 위하여 해양 환경하의 콘크리트 교량에 대한 염해 성능평가를 수행하였으며, 이를 위하여 구조부재별 염해에 따른 수명 예측 적용사례를 통해 해양 환경하에 있는 신설 콘크리트 교량 구조물의 설계 시 내구성 증진 방안을 고찰하였다.

한국도로공사의 해상교량 염해 내구성 평가 및 내염 성능 향상방안 연구에서는 염해 내구성 설계 및 평가 등이 반영되지 않은 해상 교량 등에서도 여전히 염화물로 인한 내구성 저하 현상이 나타나고 있는 실정이므로 해양 환경 교량의 염해 조사를 토대로 염해내구성 평가 및 향상 방안을 검토하였으며, 그 결과 내염설계 미적용 해상교량의 공용기간이 10~18년 사이임에도 불구하고 간만대 및 비포말대의 염해손상은 철근위치에서 임계염화물량을 초과하여 진전기에 해당하는 경우가 많고 적기에 염해방지 대책이 수립되지 않을 경우 보수비용 증가가 우려됨을 지적하였으며, 예방적 유지관리는 경제·산업적 측면에서 볼 때 해상 콘크리트 구조물의 수명연장 및 유지관리 비용 절감에 기여할 것으로 판단된다고 고찰하였다⁹⁾. 본 연구는 한국도로공사의 기존연구⁹⁾에서 언급하고 있듯이 염해 내구성 설계 및 평가 등이 반영되지 않은 해상 교량에서도 염화물로 인한 내구성 저하 현상이 나타나고 있는 실정

을 감안하여, 해양 환경하의 콘크리트 교량의 설계 단계에서 염해 성능평가를 수행하여 교량의 주요 구조부재별 염해에 따른 수명을 예측하였다.

또한 Will D. Lindquist 등은 균열이 콘크리트 바닥판 염화물 함유량에 미치는 영향에 관한 연구에서 현장조사 결과 교량 바닥판 형식이 염화물 함유량에 큰 영향을 미치지 않으며, 연구 대상샘플의 경우 균열에서 벗어난 상부의 염화물 평균 농도는 기존 철근 부식 임계값의 가장 보수적인 추정치를 거의 초과하지 않았지만 균열 지점에서 채취한 염화물 농도는 보통 1년 이내에 기존 철근 부식 임계값을 초과한다고 하였다¹⁰⁾. 본 연구에서는 Will D. Lindquist 등의 기존연구¹⁰⁾가 고찰하고 있는 균열이 있는 지점에서 콘크리트 바닥판 염화물 함유량은 철근부식에 영향을 미치고 있다는 점을 감안하여, 해양 환경하의 철근콘크리트 교량의 주요 부재에 대한 설계수명 100년을 확보하기 위한 피복두께를 산정하였다.

David Darwin 등은 제설제가 콘크리트 열화에 미치는 영향 연구에서 증류수와 공기에 노출된 콘크리트는 주로 수분 함량의 변화로 인해 각각 탄성 계수의 증가와 감소를 나타낸다고 하며, 낮은 농도에서 NaCl 및 CaCl₂는 콘크리트의 특성에 상대적으로 작은 부정적 영향을 미치고 높은 농도에서 CaCl₂, MgCl₂ 및 CMA는 콘크리트에서 상당한 변화를 일으켜 재료 손실과 강성 및 강도 감소를 초래한다고 고찰하였다¹¹⁾. David Darwin 등의 기존연구¹¹⁾에서 제설제가 콘크리트에서 상당한 변화를 일으켜 재료 손실과 강성 및 강도 감소를 초래한다고 고찰한 것에 반해, 본 연구에서는 염해의 영향을 받고 있는 해양 환경하의 철근콘크리트 교량에 대한 염해수명 산정에 대해 고찰하여 차별성을 갖고 있으며, 이를 위하여 해양 환경하의 철근콘크리트 교량의 주요 부재에 대한 설계수명 100년을 확보하기 위한 배합설계에 대해 고찰하였다.

2.2. 콘크리트구조 설계기준

콘크리트 구조 설계기준에서는 해풍, 해수, 황산염 및 기타 유해물질에 노출된 콘크리트는 내구성 허용기준 조건을 만족하는 콘크리트를 사용하여야 한다고 되어 있으며, 내구성 허용기준에서는 철근의 부식방지를 위해서 굳지 않은 콘크리트의 전체 염소이온량은 원칙적으로 0.3 kg/m³이하로 하여야 한다고 규정하고 있다¹²⁾.

또한 노출등급에 따른 내구성 허용기준은 콘크리트 내 최대 수용성 염소이온(Cl^-)량(시멘트 질량에 대한 %)으로 Table 1과 같이 규정하고 있다. 콘크리트의 배합은 노출등급 C2의 경우 최대 물-결합재비 0.4, 최소

Table 1. Maximum volume of soluble chlorine in concrete(% of cement mass)

| Exposure rating | Concrete condition | Maximum volume of soluble chlorine in concrete (%) |
|-----------------|--|--|
| C0 | Concrete that is dry or protected from moisture | 1.0 |
| C1 | Other reinforced concrete exposed to water but not to external chloride | 0.3 |
| C2 | Concrete exposed directly to chloride, such as deicing chemicals, salt, salt water, sea water or sea spray | 0.15 |

설계기준압축강도 35 MPa로 규정하고 있다¹²⁾.

한편 해안에서 250 m 이내에 위치하는 구조체로서 추가의 표면처리 공사를 수행하지 않고 직접 외부에 노출되어 염해를 받는 특수 환경에 노출되는 현장치기콘크리트는 D16 이하의 철근을 사용한 벽체, 슬래브는 50 mm, 이 이외의 모든 부재는 80 mm 이상의 피복 두께를 확보하여야 한다고 규정하고 있다¹³⁾. 또한 내구성 증진의 한 방편으로 고부식성 환경조건에 있는 구조는 표면을 보호하여 내구성을 증진시켜야 한다고 규정하고 있다¹²⁾.

2.3. 도로교 표준시방서, 콘크리트 표준시방서

콘크리트 표준시방서와 도로교 표준시방서에서는 해양 콘크리트 구조물에는 해상도시, 해상공항, 해상발전소, 해저 저유 탱크, 해저 거주기지, 선박 정박시설, 도크, 해저 터널, 해상교량, 방파제, 계선안(繫船岸) 및 해안제방 등이 있으며, 육상구조물 중에 해풍의 영향을 많이 받는 구조물도 해양콘크리트로 취급하여야 한다고 적용범위를 규정하고 있다^{1,14)}. 또한 해상부는 해중, 간만대, 물보라 지역, 해상대기 중으로 구분하여 내구성 대책을 수립하여야 한다고 규정하고 있다^{1,14)}. 이와 같이 해양 콘크리트 구조물은 염해를 받기 쉬운 환경에 노출되기 쉽기 때문에 콘크리트 열화 및 강재의 부식에 의해 그 기능이 손상되지 않도록 하여야 하며, 장기 내구성을 요하는 중요한 구조물의 경우 콘크리트의 성능저하 방지와 강재의 부식을 방지할 수 있는 추가적인 조치를 취하여야 한다고 규정하고 있다. 또한 재료적 특성으로 시멘트는 해수의 작용에 대하여 특히 내구적이어야 하므로 고로슬래그 시멘트, 플라이애쉬 시멘트 등 혼합시멘트계 및 중용열 포틀랜드 시멘트를 사용하여야 하며, 이들 혼합 시멘트계는 내해수성 이외에도 장기 재령의 강도가 크고 수화열이 적은 이점이 있어 해양콘크리트에 적합하지만 초기강도가 작은 결점이 있어 초기 습윤양생에 주의하여야 한다고 규정하고 있다¹⁾.

3. 현장조사를 통한 콘크리트 염해 조사 결과 및 고찰

본 연구에서는 해양 환경하에 신설되는 대상 콘크리트 교량 건설공사 현장에 대한 콘크리트 구조물의 염해수명을 예측하고 이에 대한 콘크리트 구조물의 장기 내구성능 향상을 위한 대책을 마련하기 위하여 대상 구조물의 주변에 인접해 있는 기존 콘크리트 구조물에 대한 현장조사를 먼저 실시하여 신설 구조물에 미치게 될 환경하중을 평가하였다.

3.1. 콘크리트 염해 조사 결과

본 연구 대상 신설 교량 건설공사가 실시될 지역의 주변 구조물에 대해 해안에서부터 거리에 따른 콘크리트 중의 염분함유량에 대한 조사를 실시하였다.

본 연구 대상 신설교량은 해상교량임을 고려하여 기존 구조물의 조사 대상 구조물을 해안가에서부터 최대한 가까운 구조물로 선정하였다. 조사대상 구조물 중 대표 구조물은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 콘크리트의 깊이별 염화물이온량을 측정하기 위하여 선택성 이온 전극을 이용한 전위차 측정법을 사용하였다. 전위차에 의한 콘크리트 중의 염화물이온량 측정실험은 시료를 105℃에서 건조시킨

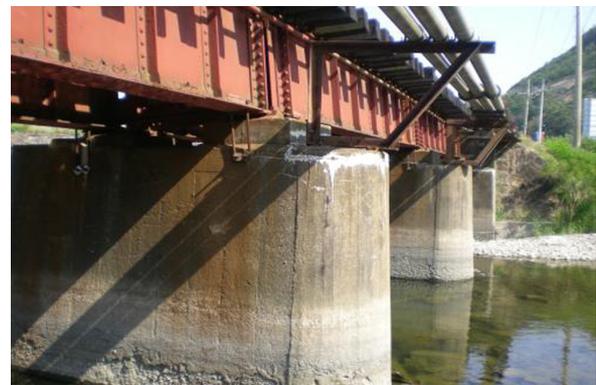


Fig. 1. Railroad bridge(1).



Fig. 2. Bridge connecting islands(1).

후 분쇄하여 No. 100체를 통과시켜 약 3 g의 분말시료를 채취하고, 증류수에 수용성 염화물을 추출하여 선택성 염화물이온 전극을 이용하여 측정하였다.

염해환경하에 노출된 콘크리트는 해수의 직접적인 접촉에 의해 해수에 포함된 염분이 콘크리트 내부로 침투, 확산되어 콘크리트 내부의 철근을 부식시키지만, 해안에서 일정한 거리만큼 떨어져 있는 경우에는 비래염분에 의해 콘크리트 내부로 염분이 침투되어 축적되게 된다. 따라서 콘크리트 내부의 염분량은 해안으로부터 떨어진 거리에 반비례하며, 염해의 정도가 다르게 된다.

본 연구에서는 해양 환경하의 콘크리트 교량이 신설될 지역의 염해환경에 대한 기존 콘크리트 구조물의 표면염화물량을 측정 분석하였으며, 콘크리트 내부의 표면염화물량 측정결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Chloride content in concrete

| Classification | Ages (year) | Distance from the coast | Strength (MPa) | Surface chloride content (kg/m ³) |
|------------------------------|-------------|-------------------------|----------------|---|
| Railroad bridge(1) | 25 | 0.3 km | 20.1 | 10.02 |
| Railroad bridge(2) | 25 | 0.4 km | 19.9 | 9.51 |
| Railroad bridge(3) | 25 | 0.3 km | 21.0 | 11.13 |
| Rural bridge(1) | 25 | 0.0 km | 17.0 | 11.44 |
| Rural bridge(2) | 35 | 0.7 km | 19.1 | 1.98 |
| Port facilities | 35 | 0.0 km | 16.7 | 12.22 |
| Bridge connecting islands(1) | 20 | 0.0 km | 25.1 | 14.92 |
| Bridge connecting islands(2) | 13 | 0.0 km | 25.0 | 12.20 |
| Bridge connecting islands(3) | 13 | 0.0 km | 25.5 | 10.01 |
| Bridge connecting islands(4) | 12 | 0.0 km | 39.0 | 13.95 |
| Bridge connecting islands(5) | 18 | 0.0 km | 23.5 | 15.11 |
| Average | | | | 10.5 |
| Mean ebb and flow | | | | 13.1 |

3.2. 콘크리트 염해조사 결과 고찰

Table 2에서 나타난 표면염화물량 측정결과 해안에 인접한 구조물 11개소의 평균 표면염화물량은 10.5 kg/m³으로 비교적 높은 표면염화물량을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 콘크리트 표준시방서 내구성편에 규정되어 있는 서/남해안 지역에 대하여 해안선으로부터 0.25 km 떨어진 해안선 근처에 대한 값 1.5~2.5 kg/m³과 비교할 때 매우 높은 값을 나타내었다. 또한 간만대 영역에 속하는 부위의 평균 표면염화물량은 13.1 kg/m³으로 높은 표면염화물량을 가지고 있었는데, 이는 콘크리트 표준시방서 내구성편의 규정 값인 설계표면염화물량인 20 kg/m³보다는 낮게 평가되었다. 그러나 시방서에서 제시된 값은 콘크리트 구조물의 수명을 100년으로 간주한 경우이므로 조사대상

구조물이 약 22년 경과되었음을 감안하면 표면염화물량이 비교적 높은 것으로 판단된다. 따라서 본 조사결과에 근거해서 대상 구조물이 신설될 해상교량의 교각부와 주탑 하단부에 대한 콘크리트 염해에 대한 내구성 평가시, 콘크리트표준시방서에서 제시하는 남해/서해안의 간만대 지역으로 구분하고 표면염화물량을 20 kg/m³으로 적용하여 안전측으로 수명을 평가하는 것이 바람직하고 생각된다. 즉, 조사대상 구조물의 경과년수가 평균 약 22년으로 신설 구조물의 100년 설계 내구성을 확보하기 위해서는 표면염화물량에 대한 설계값을 시방서 기준으로 하는 것이 타당하다고 생각된다.

한편, 상부구조는 간만대로 분류한 교각이나 주탑하부에 비하여 연직높이를 고려하여 설계 표면염분량을 선정할 필요가 있다. 이에 대해 콘크리트표준시방서에서는 해발 1 m의 차이를 해안선으로부터 수평거리 25 m 차이로 간주하고 있으므로 대상 신설구조물인 PSC 상자형 교량 해상구간의 경우 최고 고조위에서 약 28 ~ 53 m 높이에 상자형 하부가 위치하므로 이는 해안으로부터 수평거리 700~1,325 m 이격된 것으로 간주할 수 있다.

따라서 상부구조는 교각 등에 비해 표면염화물량의 현저한 감소가 예상되지만 내구년한 100년을 설계수명으로 볼 때 공용기간이 25년 경과되었고 해안가로부터 400~700 m정도 이격된 조사 대상구조물의 표면염분량 중 최대값인 9.51 kg/m³을 적용하여 수명을 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 구조부위별 내구성 수명 예측

4.1. 구조부재별 설계사항

현장조사 결과를 기초로 본 연구의 내구성 수명평가를 위한 대상 신설 구조물의 콘크리트 배합설계안은

Table 3. Mix design plan of in the target new structures

| Structure type | Box girder | Pier | Tower |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|
| f_{ck} (MPa) | 40 | 35 | 40 |
| Type of cement | blended cement | blended cement | blended cement |
| G_{max} (mm) | 19 | 25 | 19 |
| Slump(cm) | 15 | 15 | 15 |
| W/C(%) | 34 | 42.1 | 34 |
| W(kg/m ³) | 173 | 166 | 173 |
| C(kg/m ³) | 405 | 394 | 405 |
| G_{abs} (%) | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| S_{abs} (%) | 1.5 | 1.5 | 1.5 |

[Note] f_{ck} : specified concrete strength, G_{max} : maximum number of coarse aggregate by volume, W/C : water-cement ratio, W : water content per unit volume of concrete, C : cement content per unit volume of concrete, G_{abs} : absorption of coarse aggregates, S_{abs} : absorptivity of fine aggregate

Table 4. Member and cover thickness in the target new structures.

| Structure type | Box girder | Pier body | Pier coping | Tower |
|----------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Section (mm) | 5,700 × 3,425 | 4,000 × 3,200 | 5,900 × 3,500 | 8,000 × 12,000 |
| Target member | Lower slab | Lower part of pier(hollowpart) | Pier coping (solid part) | Lower part of tower |
| Member thickness(mm) | 400 | 750 | 1950 | 1200 |

Table 3과 같으며, 대상 신설 구조물의 각 부재 두께 및 피복두께는 Table 4와 같다.

4.2. 구조부재별 탄산화 수명 예측 결과

본 연구에서는 설계 내구년한 100년을 만족하는 콘크리트 구조물을 목표로 탄산화에 대한 서남해안 콘크리트 구조물에 대한 내구성능조사^{15,16)}와 콘크리트표준시방서의 내구성 및 유지관리편 등을 참고로 대상 신설 교량 공사 현장 콘크리트 구조물에 대한 수명을 검토한 결과, Table 5와 같은 결과를 도출하였다.

Table 5. Results of life prediction caused by the carbonation coefficient

| Structure type | Box girder | Pier body | Pier coping | Tower |
|-----------------------------|---|----------------|----------------|----------------|
| Carbonation coefficient (A) | 5.856(Southern Coast Campaign) 6.175(Construction site area) | | | |
| Result of life prediction | 93 - 103 years (Average age is less than 100 years) | Over 100 years | Over 100 years | Over 100 years |

Table 5의 탄산화속도계수를 이용한 수명평가결과, 피복두께 60 mm인 상자형의 내구년한은 100년에 미달 되는 것으로 나타났다. 따라서 상자형 교량의 경우 피복두께 증가 또는 표면처리제 도포 등의 방법을 이용해서 탄산화를 촉진하는 오염물질이 침투하는 것을 방지하거나 지연시킬 필요가 있으며, 대상 구조물은 해상 구조물로서 일반적으로 염화물에 의해 탄산화 진행속도가 증가함을 고려할 때 탄산화와 염해를 모두 고려한 복합적인 대책이 필요하다고 판단된다.

4.3. 구조부재별 염해 수명

4.3.1 수명 예측 방법

염소이온 침투에 따른 내구성능 저하정도 추정은 식 (1)의 확산방정식(Fick의 제 2법칙)을 적용한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, D 는 콘크리트 구조물에 관한 환경계수 (m^2/sec), C 는 콘크리트 중의 염소이온농도(kg/m^3), x 는 콘크리트 표면에서의 거리(m), t : 시간(sec)이다.

콘크리트 표면의 염소이온 농도와 염소이온 확산계수가 일정한 조건하에서 콘크리트중의 염소이온농도 C 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(x,t) = C_o(1 - erf \frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad (2)$$

여기서, $C(x,t)$ 는 시각 t 에 있어서 철근 위치 x 에서의 염소 이온 농도, C_o 는 콘크리트 표면에서의 염소 이온 농도(kg/m^3)이다.

또한, 콘크리트의 염소이온의 침입에 대한 저항성 평가지표는 확산계수의 설정으로서, 본 연구에서 사용한 ACI Life-365에서는 시간에 따른 변동성을 갖는 염화물 확산계수 D 를 식 (3)과 같이 고려하고 있다.

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (3)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간 t 에서의 확산계수, D_{ref} 는 기준 시간 t_{ref} 에서의 확산계수(보통 t_{ref} 는 28일), D_{28} 는 t_{ref} 가 28일 즉 재령 28일에서의 염소이온 확산계수, m 은 확산계수 감소상수로 보통시멘트를 사용한 경우는 0.2, t_{ref} 는 기준시간, t 는 경과시간이다. 또한 D_{28} 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40 W/B)} m^2/sec \quad (4)$$

여기서, W/B 는 물-결합재비이다.

한편, ACI 365에서는 플라이애쉬, 고로슬래그 등 혼화재 사용에 따른 효과를 고려하고 있는데, ACI 365에서는 플라이애쉬나 고로슬래그 모두 콘크리트 초기재령에서의 염분확산계수 혹은 임계염화물량에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하고 있고, 단지 재령계수(염분확산성의 감소율) m 에 대해 영향을 미치는 것으로 하고 있으며, 이때 m 의 값은 혼화재료의 사용에 따라 식 (5)와 같이 수정될 수 있다.

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (5)$$

여기서, FA(%)는 총결합재 중량에 대한 플라이애쉬 함유율(%), SG(%)는 총결합재 중량에 대한 고로슬래그

Table 6. Effects of anti-corrosion agent on critical chloride content

| CNI Usage (l/m^3 , concrete) | Critical chloride content (%/Concrete) | Critical chloride content (kg/m^2) |
|------------------------------------|---|---|
| 0 | 0.05 | 1.2 |
| 10 | 0.15 | 3.6 |
| 15 | 0.24 | 5.6 |
| 20 | 0.32 | 7.5 |
| 25 | 0.37 | 8.7 |
| 30 | 0.40 | 9.4 |

[Note] The unit weight of concrete is assumed to be $2,350 \text{ kg/m}^3$

함유율(%)로서 플라이애쉬(FA)는 50%, 고로슬래그(SG)는 70%까지만 유효하다.

플라이애쉬와 고로슬래그 등의 혼화재와 달리 혼화제인 방청제는 또 다른 효과를 가정하여 ACI 365에서는 성능이 확인된 두 종류의 화학혼화제인 방청제를 고려할 수 있도록 하고 있는데, 그 중 하나가 Calcium Nitrite Inhibitor(CNI)이며, 이 방청제는 환산계수와 재령계수(염분확산성의 감소율) m 에는 영향을 전혀 미치지 않고 다만 임계 염화물이온량 C_{lim} 에 Table 6과 같이 영향을 미치는 것으로 고려하고 있다.

한편, 콘크리트 표면에 피막처리하는 등의 표면처리하는 것에 대해서 ACI 365에서는 표면 염화물량의 누적속도에만 영향을 미치는 것으로 고려되고 있으며, 초기 100%의 효율을 갖고 기본적으로 20년의 수명을 갖고 효과를 발휘하는 것으로 가정하고 있으나 이 값은 사용자에게 의해 수정할 수 있다.

4.3.2 구조부재별 염해수명 예측 결과

현장조사 결과를 기초로 염해에 대한 수명평가는 설계 표면염화물량을 교각 및 주탑부에 대해서는 20 kg/m^3 , 상부구조에 대해서는 9.51 kg/m^3 로 설정하고 ACI 365에 의해 내구수명을 평가하였으며, 각 구조부재별 중요변수를 일반시멘트 사용, 2성분계 혹은 3성분계 혼합시멘트의 사용 및 방청제와 표면처리제 사용 등으로 구분하여 평가하였다¹⁷⁾.

본 연구의 대상 구조물에 대한 구조부재별 염해수명 예측사례는 상자형, 교각하부(중공부), 교각코핑부, 주탑하단의 4개의 구조부재에 대하여 수행하였으며, 구조부재별 검토조건은 Table 7과 같다.

본 연구대상 구조물에 대해 상자형, 교각하부(중공부), 교각코핑부, 주탑하단부의 염해수명 예측결과를 Table 8~11에서 각각 나타내었다.

Table 8에서 상자형은 물-시멘트비 34%로 배합한 대조군의 경우 염해수명은 17년으로 나타나 설계수명

Table 7. Review of design conditions by structural members

| Structure type | Box girder | Lower part of pier (hollow part) | Pier coping | Lower part of tower |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|-------------|---------------------|
| f_{ck} (MPa) | 40 | 35 | 35 | 40 |
| W/C(%) | 34 | 42 | 42 | 34 |
| t(cm) | 40 | 75 | 195 | 120 |
| c(cm) | 6 | 15 | 10 | 15 |
| Type of cement | Ordinary cement(base), Binary system or three-stage mixed cement(substitute plan) | | | |
| Type of concrete | 19-40-15 | 25-35-15 | 25-35-15 | 19-40-15 |
| Protective coating | Inapplicableness(base), Dermatogenesis(substitute plan) | | | |
| Anti-corrosion drug | Inapplicableness(base), Proper use(substitute plan) | | | |
| Max. design quantity (kg/m^3) | 9.51 | 20 | 20 | 20 |
| Amount of surface sal | Max. design quantity. Assume that after exposure to the atmosphere the maximum is reached in approximately 10 years. | | | |
| Cover thickness (c) | 60mm | 150mm | 100mm | 150mm |

[Note] f_{ck} : specified concrete strength, W/C : Water-cement ratio, t : member thickness, c : cover thickness

Table 8. Mix setup and detailed evaluation result of box girder

| Case | Base case | Case_1 | Case_2 | Case_3 |
|--------------------------|-----------|--------|--------|--------|
| W/B(%) | 34 | 34 | 34 | 34 |
| B-Slag(%) | - | 60 | 50 | 50 |
| F-A(%) | - | - | 20 | - |
| Anti-cor | - | - | - | 10 |
| Surface | - | ○ | - | ○ |
| Life(years) | 17 | 110 | 133 | 214 |
| Life ratio for base case | 1.0 | 6.4 | 7.8 | 12.6 |
| Life ratio for case_1 | - | 1.0 | 1.2 | 1.9 |
| Judgement | N.G | O.K | O.K | O.K |

[Note] W/B : Water-binding ratio(%), B-slag : Blast furnace slag replacement rate(%), F-A : Fly ash replacement rate(%), Anti-cor : Anti-correspondent use(l/m^3 , concrete), Surface : Surface processing status, Life : Estimated durable life(years)

100년에는 크게 못 미쳤다. 그러나 실험군으로 설정한 고로슬래그를 60% 사용하고 표면에 피막처리 등의 표면처리를 한 경우 염해수명은 110년, 고로슬래그 50%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우에는 염해수명은 133년, 고로슬래그 50%를 사용하고 방청제를 $10l/m^3$ 및 표면처리를 한 경우에는 염해수명은 214년으로 각각 나타나 설계수명 100년을 크게 상회하는 것으로 나타났다.

Table 9에서 교각하부(중공부)는 물-시멘트비 42%로 배합한 대조군의 경우 염해수명은 38년으로 설계수명

Table 9. Mix setup and detailed evaluation result of lower part of pier(hollow part)

| Case | Base case | Case_1 | Case_2 | Case_3 |
|--------------------------|-----------|--------|--------|--------|
| W/B(%) | 42 | 42 | 42 | 42 |
| B-Slag(%) | - | 40 | 40 | - |
| F-A(%) | - | - | 20 | - |
| Anti-cor | - | - | - | 15 |
| Surface | - | - | - | ○ |
| Life(years) | 38 | 137 | 339 | 123 |
| Life ratio for base case | 1.0 | 3.6 | 8.9 | 3.2 |
| Life ratio for case_1 | - | 1.0 | 2.5 | 0.9 |
| Judgment | N.G | O.K | O.K | O.K |

Table 10. Mix setup and detailed evaluation result of pier coping

| Case | Base case | Case_1 | Case_2 | Case_3 |
|--------------------------|-----------|--------|--------|--------|
| W/B(%) | 42 | 42 | 42 | 42 |
| B-Slag(%) | - | 60 | 50 | - |
| F-A(%) | - | - | 20 | 20 |
| Anti-cor | - | - | - | 15 |
| Surface | - | - | - | ○ |
| Life(years) | 19 | 110 | 158 | 134 |
| Life ratio for base case | 1.0 | 6.1 | 8.8 | 7.4 |
| Life ratio for case_1 | - | 1.0 | 1.4 | 1.2 |
| Judgement | N.G | O.K | O.K | O.K |

100년에는 크게 못 미쳤다. 그러나 실험군으로 설정한 고로슬래그를 40% 사용한 경우 염해수명은 137년, 고로슬래그 40%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우 염해수명은 339년, 방청제를 15l/m³ 및 표면처리를 한 경우 염해수명은 123년으로 각각 나타나 설계수명 100년을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

Table 10에서 교각코핑부는 물-시멘트비 42%로 배합한 대조군의 경우 염해수명은 19년으로 설계수명 100년에는 크게 못 미쳤다. 그러나 실험군으로 설정한 고로슬래그를 60% 사용한 경우 염해수명은 110년, 고로슬래그 50%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우 염해수명은 158년, 플라이애쉬 20%를 사용하고 방청제를 15l/m³ 및 표면처리를 한 경우 염해수명은 134년으로 각각 나타나 설계수명 100년을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

Table 11에서 주탑하단부는 물-시멘트비 34%로 배합한 대조군의 경우 염해수명은 57년으로 설계수명 100년에는 못 미쳤다. 그러나 실험군으로 설정한 고로슬래그를 40% 사용한 경우 염해수명은 210년, 고로슬래그 40%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우 염해수명은 500년, 방청제를 15l/m³ 및 표면처리를 한 경우 염해

Table 11. Mix setup and detailed evaluation result of lower part of tower

| Case | Base case | Case_1 | Case_2 | Case_3 |
|--------------------------|-----------|--------|--------|--------|
| W/B(%) | 34 | 34 | 34 | 34 |
| B-Slag(%) | - | 40 | 40 | - |
| F-A(%) | - | - | 20 | - |
| Anti-cor | - | - | - | 15 |
| Surface | - | - | - | ○ |
| Life(years) | 57 | 210 | 500 | 181 |
| Life ratio for base case | 1.0 | 3.7 | 8.8 | 3.2 |
| Life ratio for case_1 | - | 1.0 | 2.4 | 0.9 |
| Judgment | N.G | O.K | O.K | O.K |

수명은 181년으로 각각 나타나 설계수명 100년을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 대상 구조물의 염해 수명은 기본 콘크리트에 비해 고로슬래그를 40% 사용한 경우에 교각하부에서는 38년에서 137년으로, 주탑에서는 57년에서 210년으로 약 3.6~3.7배 증가하였고, 고로슬래그를 60% 사용한 경우에 약 6.1배 증가함을 알 수 있다. 또한 고로슬래그를 40%를 사용한 경우의 염해 수명에 비해 고로슬래그 40%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우의 염해수명은 교각하부에서는 137년에서 339년으로, 주탑에서는 210년에서 500년으로 약 2.4~2.5배 증가하였고, 고로슬래그 50%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우의 염해수명은 기본 콘크리트 염해 수명에 비해 약 7.8~8.8배 증가하였다. 마지막으로 방청제를 15l/m³ 사용하고, 표면처리를 한 경우의 염해수명은 기본 콘크리트 염해 수명에 비해 약 3.2배 증가하였다.

Table 11의 주탑하단부의 염해 수명 예측결과를 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같으며, 한편 Table 11의 결과에 의한 주탑하단부에 대한 배합종류별 경과시간에 따른 염분량 침투이력은 Fig. 4와 같다.

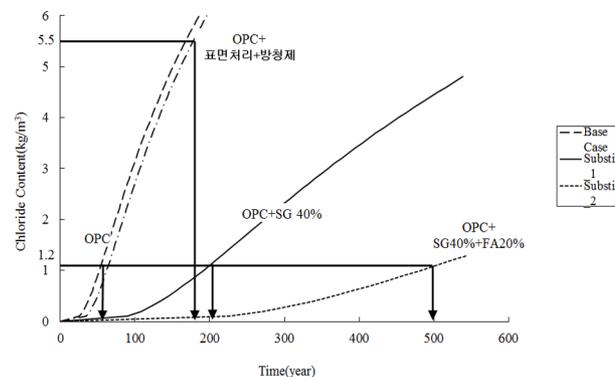


Fig. 3. Penetration history of salt powder by mixing type (lower part of tower).

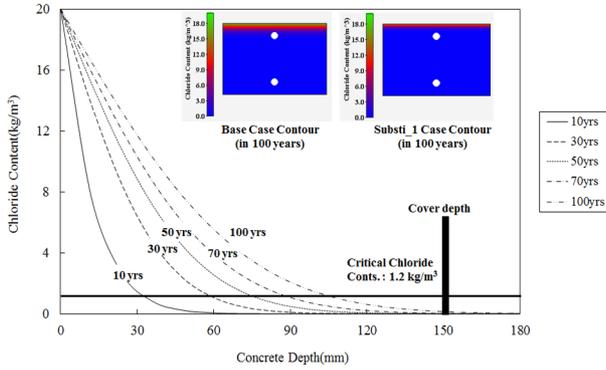


Fig. 4. Effects of chloride penetration inhibition based on case 1 (Lower part of tower).

Fig. 3에서 주탑하단부의 염해수명은 방청제 $15l/m^3$ 를 사용하고 표면처리를 한 경우에 181년, 고로슬래그를 40% 사용한 경우에는 210년, 그리고 고로슬래그 40%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우에 500년으로 각각 나타나 설계수명 100년을 만족하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4의 결과에서 설계수명 100년을 확보하기 위해서 주탑하단부의 피복두께를 150 mm로 설정하면 염분량의 침투에 충분히 대응할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 해양 환경하에 신설되는 콘크리트 교량에 대해서 염해를 중심으로 한 환경하중의 영향을 현장조사를 통하여 평가함으로써 보다 현장 친화적인 내구수명 분석 뿐만 아니라 고로슬래그, 플라이애쉬 등의 사용에 따른 염해수명 증진효과를 판단할 수 있었다.

서남해안 지역의 기존 콘크리트에서 표면염화물량 측정 결과, 해안에 근접한 구조물의 11개소의 평균 표면염화물량은 10.5 kg/m^3 으로서 콘크리트 표준시방서의 규정값과 비교할 때 매우 높은 값으로 나타내었으며, 간만대 영역의 평균 표면염화물량은 콘크리트 표준시방서의 규정값과 비교해서 낮게 평가되었다.

이러한 결과는 향후 신설 구조물의 설계 및 시공시 염해환경에 의한 영향 평가는 시방서의 기준값과 차이가 크기 때문에 현장조사에 기초한 평가가 바람직하다는 것을 시사하고 있다.

한편, 본 연구에서 실시한 현장조사 결과를 기초로 염해 환경하에서의 수명 증진 효과를 현장에서 일반적으로 사용되는 재료를 중심으로 검토한 결과, 고로슬래그를 40~60% 사용한 경우 상자형, 교각, 주탑하단부 콘크리트에 대한 염해 수명은 설계수명인 100년을

상회하였다.

고로슬래그를 40% 사용한 경우의 염해수명은 교각 하부에서는 38년에서 137년으로, 주탑에서는 57년에서 210년으로 기본 콘크리트에 비해 약 3.6~3.7배 증가하였고, 고로슬래그를 60% 사용한 경우에는 약 6.1배 증가함을 알 수 있었다.

또한 고로슬래그 40%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우의 염해수명은 고로슬래그를 40%를 사용한 경우의 염해수명에 비해 교각하부에서는 137년에서 339년으로, 주탑에서는 210년에서 500년으로 약 2.4~2.5배 증가하였고, 고로슬래그 50%와 플라이애쉬 20%를 사용한 경우의 염해수명은 기본 콘크리트 염해 수명에 비해 약 7.8~8.8배 증가하였다. 방청제를 $15l/m^3$ 사용하고, 표면처리를 한 경우의 염해수명은 기본 콘크리트 염해 수명에 비해 약 3.2배 증가하였다.

따라서, 국내에서 생산 유통되고 있는 혼화재 및 혼화제를 적절하게 사용한 경우 현장조사에서 나타난 높은 염해 환경하중 하에서도 콘크리트의 목표내구연한 100년 수준을 충분히 만족할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글 : 이 연구는 신구대학교 2017년도 교원전공직무역량강화 사업의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) The Ministry of Construction and Transportation, "Concrete Standard Specification", pp. 170-173, 2009.
- 2) Korea Concrete Institute, "The Latest Concrete Engineering", pp. 509-510, 2007.
- 3) D. B. Kim, K. J. Kwon and B. W. Park, "A Study on the Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures with Chloride Penetration", J. Korean Soc. Saf., Vol. 20, No. 2, pp. 113-118, 2005.
- 4) K. J. Kwon, D. B. Kim, S. H. Jung and S. T. Chae, "A Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures in Chloride Containing Environments", J. Korean Soc. Saf., Vol. 22, No. 3, pp. 51-56, 2007.
- 5) W. K. Chai, S. H. Kim, Y. H. Son, J. W. Park and C. B. Lee, "Analysis on Durability Performance Enhancement and Economical Efficiency through Chloride Protection for Concrete Structures", J. Korean Soc. Saf., Vol. 25, No. 6, pp. 157-162, 2010.
- 6) J. S. Chung, B. H. Kim and I. S. Kim, "A Case Study on Chloride Corrosion for the End Zone of Concrete Deck Subjected to De-icing Salts Added Calcium Chloride", J.

- Korean Soc. Saf., Vol. 29, No. 6, pp. 87-93, 2014.
- 7) W. K. Chai, M. G. Lee and Y. H. Son, "Field Research for the Durability Assessment Factor for deriving the Carbonation of Concrete Bridges in the Marine Environment", J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 6, pp. 101-109, 2015.
 - 8) Korea Institute of Construction Technology, "Development of Durability Assessment Technology for Concrete Bridge Damage", pp. 105-106, 2001.
 - 9) The Korea Road Corporation, Road Traffic Research Institute, "Assessment of Durability of Salt Damage on Offshore Bridges and Improvement of Internal Salt Performance", 2013 Report of Practical Use Cases, p. 54, 2013.
 - 10) W. D. Lindquist, D. Darwin, J. Browning, and G. G. Miller, "Effect of Cracking on Chloride Content in Concrete Bridge Decks", ACI Materials Journal, Nov.-Dec. 2006, pp. 467-473, 2006.
 - 11) D. Darwin, J. Browning, L. Gong, and S. R. Hughes, "Effects of Deicers on Concrete Deterioration", ACI Materials Journal, Nov.-Dec. 2008, pp. 622-627, 2008.
 - 12) The Ministry of Construction and Transportation, "Concrete Structural Standards", pp. 76-79, 2012.
 - 13) The Ministry of Construction and Transportation, "Concrete Structural Standards", p. 88, 2012.
 - 14) The Ministry of Construction and Transportation, "Highway Bridges Standard Specification", p. 228, 2013.
 - 15) W. K. Chai, M. G. Lee, Y. H. Son and S. W. Hong, "Field Survey Study on Durability Assessment Factors for a Concrete Bridge under Marine Environment", Spring Conference of the Korean Society of Safety, p.175, 2015.
 - 16) W. K. Chai, M. G. Lee, Y. H. Son, S. W. Hong, "Field Survey Study on Durability Assessment Factors for a Concrete Bridge under Marine Environment(2)", Fall Conference of the Korean Society of Safety, p.47, 2015.
 - 17) ACI Committee 226, "Ground Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", ACI Materials Journal, Jul.-Aug., pp. 327-342, 1987.