

해안매립지에 위치한 콘크리트구조물의 염해조사

Investigation of Salt Attack of Concrete Structures Exposed to Reclaimed Marine Land

김성수* 정란** 김영웅*** 김용철**** 박광필*****
Seong-Soo Kim Ran Cheong Young-Ung Kim Young-Chul Kim Kwang-Pil Park

ABSTRACT

Chloride ions have a tendency to penetrate into concrete and proceed the corrosion by depassivating rebar surface. Thus the deteriorated concrete is subject to experience severe degrading of durability under marine environment. In this study, concrete structures exposed to reclaimed marine land were investigate to find out the salt attack along with analysis and review of it's cause. Under the reclaimed marine land, the main causes of deterioration of concrete structures is the steel corrosion due to the penetration of chlorides and the deterioration of outer concrete itself by chemical attack.

1. 서론

최근 우리 나라는 경제성장과 더불어 기간산업의 발전에 따른 물류 수송의 급증, 교통난 해소 및 토지부족 등으로 인하여 서해대교, 인천국제공항, 영종대교, 광안대교 등과 같이 해양환경하에 대형 구조물들의 축조가 증가하고 있는 실정이다. 대부분의 이러한 구조물은 해안매립지 혹은 해양환경하에 철근콘크리트 또는 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 건설되어 있으며, 이들 구조물의 내구성이 안전성에 큰 영향을 미치기 때문에 구조물의 내구성에 대한 관심이 집중되고 있다.

해양대기중에 위치한 콘크리트 구조물의 경우 비래염분의 영향을 받아 콘크리트중에 염분이 축적되지만, 해안매립지의 경우 지하수에 의해 구조물의 외벽으로 직접 염분이 침투하여 확산됨으로서 콘크리트구조물의 내구성을 저하시키는 원인이 되고 있다. 특히, 해안매립지 콘크리트구조물의 외벽에 방수가 확실하게 이루어지지 않은 경우에는 수압에 의해 지하수가 쉽게 콘크리트 속으로 침투됨으로서 지하수속에 함유된 염분도 쉽게 콘크리트내부에 축적될 수 있으며, 지하구조물의 특성상 외벽은 지하수에 노출되고, 내벽은 공기중에 노출되기 때문에 염분의 축적이 용이할 뿐만아니라 산소의 공급도 원활하여 염분에 의한 철근의 부식을 가속시킬 수 있는 문제점을 내포하고 있다.

* 정회원, 대전대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 단국대학교 건축공학과 교수

*** 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 소장

**** 정회원, 인천국제공항공사 공항설계팀 과장

***** 정회원, 대전대학교 대학원 토목공학과 석사과정

본 연구에서는 해안매립지에 위치한 콘크리트구조물의 염해정도를 조사하기 위하여 해안매립지에 위치한 지하 콘크리트구조물의 외벽에서 코아공시체를 채취하여 깊이별 염화물이온 및 황산염이온량을 측정분석하고, 내구수명을 평가하였으며, 콘크리트의 열화정도를 알아보기 위하여 SEM에 의한 미세조직의 분석 및 XRD에 의해 반응생성물에 대하여도 분석, 고찰하였다.

2. 실험개요

2.1 실험방법

(1) 콘크리트중의 염화물이온 추출 및 측정

본 연구에서는 선택성 이온 전극을 이용한 전위차 측정법을 사용하였으며, AASHTO T260에 의해 콘크리트 구조물에서 채취한 코아 시료를 105℃에서 건조시킨 후 분쇄하여 No. 100 체를 통과시켜 약 3g의 분말시료를 채취하여 수용성 염화물이온을 추출하고 시료를 50℃로 가열하고, 50℃의 온수를 첨가하여 보온한 후 30분간 진동시켜 가용성 염화물을 추출한다. 보온된 용액을 흡입 여과하여 여과액을 분리하고 질산용액을 첨가하여 산성으로 만든 후 선택성 염화물이온 전극을 이용하여 측정하였다.

(2) 콘크리트중의 황산염 이온량 측정

시료를 50℃로 가열하고, 50℃의 온수를 첨가하여 보온한 후 30분간 진동시켜 가용성 황산염을 추출한다. 보온된 용액을 흡입 여과하여 여과액을 분리하고 methanol-formaldehyde를 첨가하여 1:1로 희석시켜 준후 황산염이온 납전극을 이용한 전위차를 측정하였다.

(3) XRD에 의한 반응생성물 분석

콘크리트 시료를 가능한 한 골재를 제거하고 회수한 시멘트 페이스트가 많은 부분을 분쇄(0.15mm체 모두 통과)하여 약 2g의 시료에 대하여 CuK(Ni Filter): 30KV, 20mA, Scanning Speed: 5/min, Full Scale: 250cps, 2θ: 5~40°의 측정조건에 따라 Rigaku, D-Max 2200+Ultima 로 측정하였다.

(4) SEM에 의한 콘크리트의 미세조직 평가

주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)은 가느다란 전자빔을 시료표면에 주사시켜 2차 전자를 발생케 하여 입체감 있는 시료의 표면상을 얻게 하는 장치이다. 시료는 시료대에 고정할 수 있는 크기이며, 일반적으로 직경 10mm 정도의 시료를 이용한다. SEM으로 관찰하는 경우 보통 보통 1000~3000배 정도의 고배율로 관찰하는 것이 목적이기 때문에 시료의 상태는 콘크리트의 시편이 이용하였다.

2.2 조사대상구조물

콘크리트의 내구성 조사를 대상으로 하는 구조물은 설계기준강도가 280kgf/cm²인 해안매립지 및 내염설계 유·무를 기준으로 다음과 같이 정하였으며, 조사 대상 구조물의 현황을 표 1에 나타내었다. 영종도 매립지의 건설 사업 초기에 시공된 콘크리트 구조물과 콘크리트의 염해 환경이 가장 가혹한 부위에 있는 구조물, 영종도의 구조물중 내염설계 콘크리트로 타설 된 구조물을 기초 조사를 실시하였다.

표 1. 조사대상구조물의 현황

구조물명	사용 시멘트	채취위치	기호명	경과연수(year)	비고
지하차도 A	내황산염	지하외벽	A	2.58	
지하차도 B	내황산염	지하외벽	B	2.42	
철도노반시설	내황산염	지하외벽	C	1.17	우레탄방수
지하 공동구	내황산염	지하외벽	D	2.25	
건축구조물 A	내황산염	지하외벽	E	2.83	외부도장
건축구조물 B	보통포틀랜드	지하외벽	F	1.83	

3. 결과 및 고찰

(1) 콘크리트 중의 염화물량 및 수명평가

해안매립지에 축조된 콘크리트구조물의 경우 토양이나 지하수에 염분이 함유되어 있기 때문에 콘크리트 중으로 염분이 침투 확산됨으로서 콘크리트 중의 철근을 부식시키는 원인이 된다.

그림 1은 해안매립지에 축조된 지하 콘크리트 구조물에서 채취한 콘크리트 코아시편에서 깊이별로 가용성염화물량을 측정하여 정리한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 염화물량이 가장 크게 나타난 D구조물은 경과연수가 2.25년 정도된 지하공동구로서 0~1cm 깊이의 염화물량이 0.3%정도였으며, 약 5cm 정도까지 염화물이 침투되었음을 알 수 있었다. 이 콘크리트 구조물은 지하 15m정도로 지하수위 아래에 위치한 부위에서 코아시편을 채취하였으며, 외벽에 방수를 실시하였으나 방수층이 파괴되어 지하수가 콘크리트 속으로 침투하였으며, 지하수속에도 거의 해수와 같은 염화물이 함유된 상태였다.

그러나 D구조물과 같은 깊이에 위치한 C구조물의 경우 외벽에 우레탄방수를 실시하여 완벽한 방수효과로 콘크리트 속으로 침투되지 못함으로서 상대적으로 적은 염화물량이 측정되었다. 한편, 측정된 염화물량에 의한 철근 부식개시시기를 예측한 결과가 그림 2에서 그림 4이다.

우선, 상대적으로 염화물량이 크게 측정된 D구조물의 경우 예측된 표면 염화물량은 약 0.48%정도이고, 평균 염화물이온 확산계수는 1.5×10^{-12} m/s 정도였으며, 철근의 위치에서 부식임계 염화물 농도 0.052%에 도달되는 부식개시 시기는 약 40년 정도로 추정되었다. 이는 표면 염화물량과 염화물이온 확산계수가 상대적으로 크게 나타났으며, 콘크리트 피복두께가 약

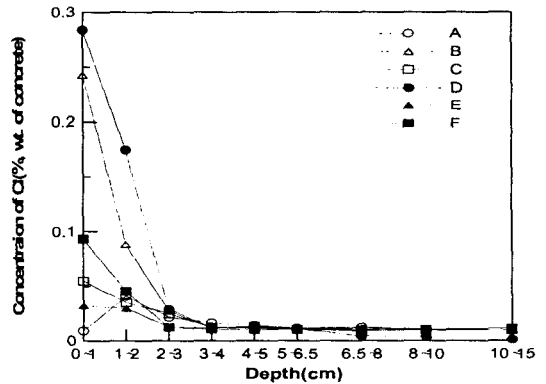


그림 1. 콘크리트의 깊이별 염화물량 측정결과

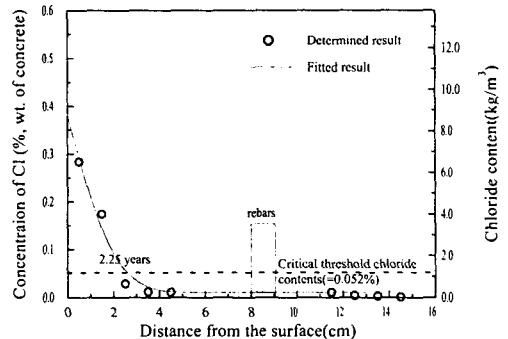


그림 2. 콘크리트의 깊이별 염화물량 측정결과(D구조물)

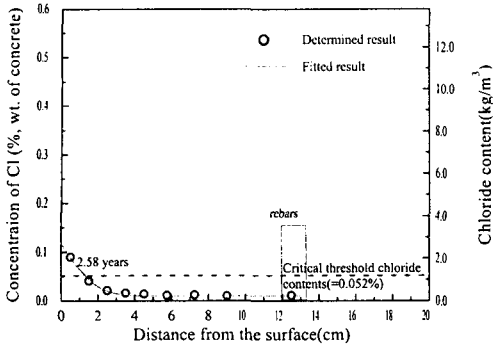


그림 3. 콘크리트의 깊이별 염화물량 측정결과(A구조물)

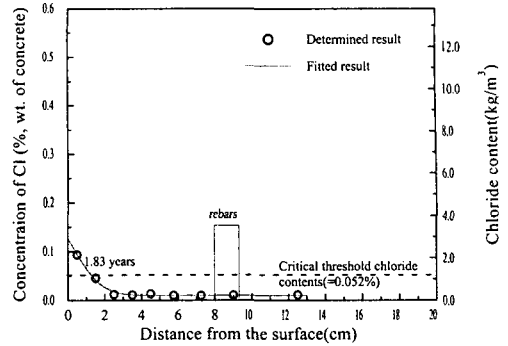


그림 4. 콘크리트의 깊이별 염화물량 측정결과(F구조물)

9cm 정도로 큼으로서 철근의 부식 개시시기가 크게 나타난 것으로 사료된다.

그러나, 그림 3 및 4에서 알 수 있듯이 상대적으로 염화물량이 적게 측정된 A 및 F구조물의 경우 철근의 부식개시 시기가 200년을 넘게 나타남을 알 수 있었다. 이는 구조물이 지하수위 보다 위에 위치에 있으며, 외벽의 방수층이 방수기능을 어느 정도 하는 것으로 평가 될 수 있다.

(2) 콘크리트중의 황산염량

황산염에 노출된 콘크리트는 시멘트 수화생성물과 SO_4^{2-} 이온이 반응하여 팽창성 물질을 생성함으로써 콘크리트 표면에서부터 열화가 진행된다. 해안매립지에 축조된 콘크리트 구조물의 경우 토양 중에 함유된 황산염에 직접 노출되기 때문에 콘크리트가 열화 될 우려가 있으며, 이에 대한 대책이 강구되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 해안 매립지에 축조된 지하구조물의 콘크리트 중에 침투한 황산염의 농도를 측정할 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 A, B 및 D구조물의 경우 콘크리트 표면에서의 깊이 0~1cm 중에 침투된 황산염량은 1.2~1.4% 정도로 크게 나타났다. 이들 구조물은 지하수위 아래에 위치해 있으며, 콘크리트 표면의 방수층이 손상되어 황산염이 쉽게 침투된 것으로 사료되며, 콘크리트 표면에 도장을 실시하거나 방수층이 형성된 C, E 및 F구조물의 경우 0.8~0.9%정도로 상대적으로 적게 나타났다.

또한, 콘크리트 중에 침투한 황산염은 구조물의 경과년수가 오래되지 않아 아직까지는 콘크리트 표면에만 침투한 것을 알 수 있으며, 콘크리트 표면 열화에 중요한 원인이 될 수 있을 것으로 사료된다.

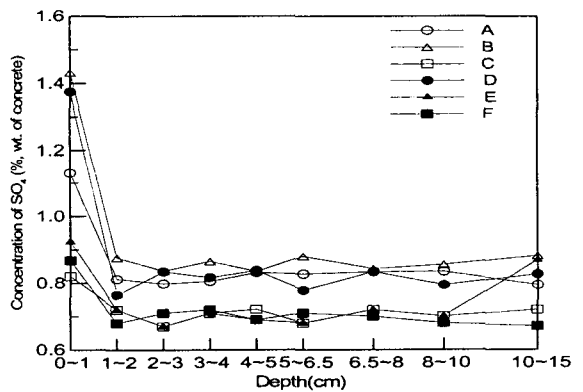


그림 5. 콘크리트의 깊이별 황산염량 측정결과

(3) XRD에 의한 반응 생성물 분석

해안 매립지에 축조된 콘크리트 구조물의 열화 원인을 알아보기 위하여 내부에서 시료에 대해 표면에서 깊이 별로 XRD에 의해 반응생성물을 분석한 결과가 그림 6 및 7이다. 이 그림에서 알 수 있듯

이 피크강도가 크지는 않지만, Cl⁻ 이온이 시멘트 경화체 속으로 침투함으로써 생성된 프리델스 솔트염(Friedel's salt), SO₄²⁻ 이온의 영향으로 생성되는 석고(Gypsum) 및 에트링가이트(Ettringite), 한랭지역의 콘크리트가 해수의 침식으로 생성된 싸우마사이트(Thaumasite), Mg²⁺ 이온과 시멘트 수화물의 반응으로 생성된 부루사이트(Brucite) 등의 반응생성물이 생성은 되었다. 특히 A, B 및 D구조물에서는 프리델스 솔트염(Friedel's salt)의 피크가 약간 크게 확인되었다. 한편, 콘크리트의 내측부위로 이동할 수록 시멘트의 주요 수화 생성물질인 수산화칼슘과(Portlandite)과 골재성분중의 석영(quartz) 및 장석(Feldspar)의 피크를 확인할 수 있었다.

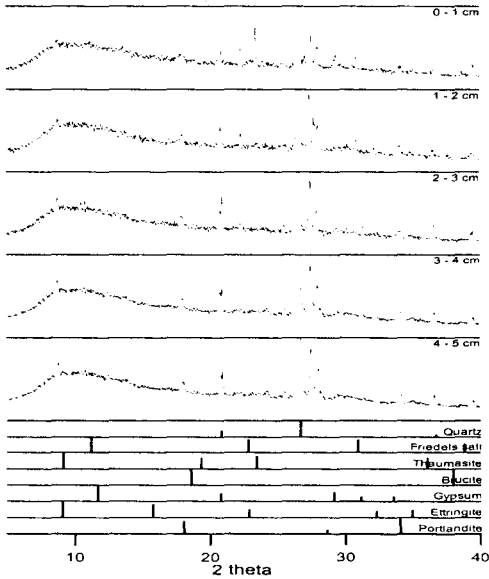


그림 6. X-Ray회절 분석결과(B구조물)

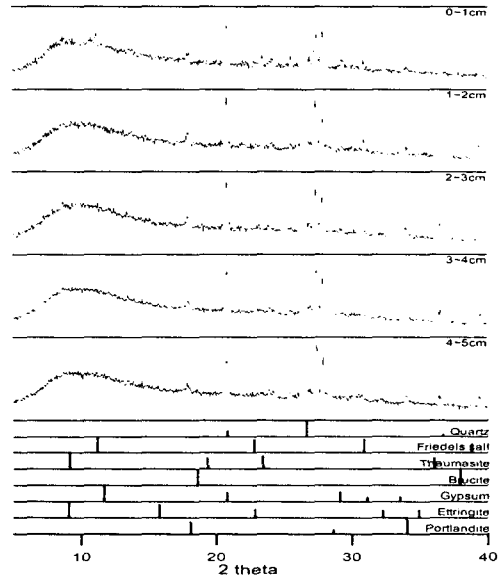


그림 7. X-Ray회절 분석결과(D구조물)

(4) 콘크리트의 미세조직의 분석

해안매립지에 축조되어 염화물 및 황산염의 영향을 받은 콘크리트의 열화 정도를 알아보기 위하여 상대적으로 침투가 많이 발생된 A, B 및 D구조물의 콘크리트 표면과 내측 부위에서 채취한 시료에 대해 5000배 확대 촬영한 것이 그림 8~11에 나타내었다.

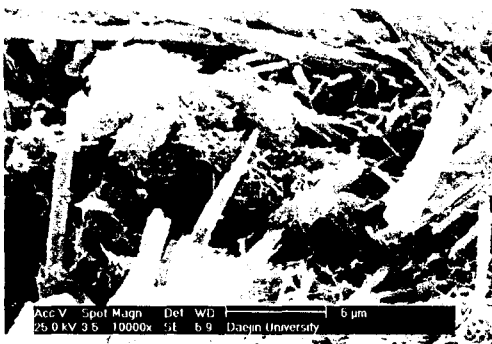


그림 8. SEM 촬영 사진(B구조물 표면부분)

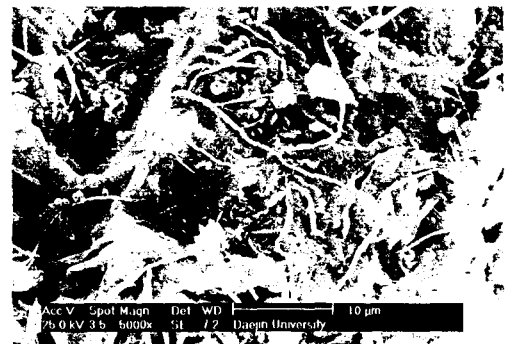


그림 9. SEM 촬영 사진(B구조물 내측부분)

그림 8 및 10은 콘크리트 표면의 부위를 확대 촬영한 것으로서 염화물과 황산염의 침투에 의해 에트링가이트(Ettringite), 프리델솔트염(Friedel's salt) 및 석고(Gypsum) 등의 반응생성물이 생성되어 콘크리트를 열화 시킨 것을 알 수 있으나, 내측 부위에서 채취한 시편인 그림 9 및 11의 경우 시멘트 수화생성물인 수산화칼륨과 C-S-H 상이 치밀하게 조직을 형성하고 있음을 알 수 있었다.

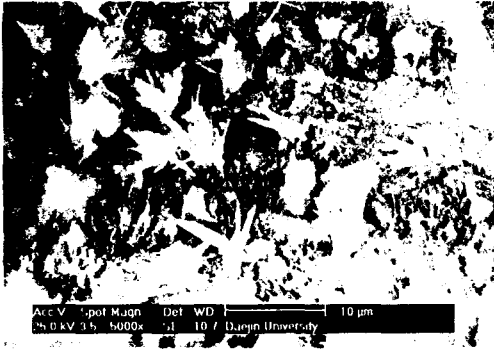


그림 10. SEM 촬영 사진(D구조물 표면부분)



그림 11. SEM 촬영 사진(D구조물 내측부분)

4. 결 론

- (1) 해안매립지에 축조한 콘크리트중의 염화물량을 측정한 결과 염화물 침투가 거의 없었으나, 지하 15m이하의 지하 공동구 구조물의 경우는 표면 염화물량은 약 0.48%정도이고, 평균 염화물 이온 확산계수는 1.5×10^{-12} m/s 정도이며, 임계농도 도달시기는 약 40년 정도로 추정되었다.
- (2) 해안매립지에 축조된 지하 구조물의 콘크리트중에 침투한 황산염 농도를 측정한 결과 염화물량이 많이 검출된 A, B 및 D구조물의 경우 황산염량이 표면에서 1.2~1.4%로 다소 높게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 콘크리트 표면에 도장을 실시하거나 방수층이 형성된 C, E 및 F구조물의 경우 0.8~0.9%정도로 상대적으로 적게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (3) 해안 매립지에 축조된 콘크리트 구조물의 열화 원인을 알아보기 위하여 내부에서 시료에 대해 표면에서 깊이 별로 XRD에 의해 반응생성물을 분석한 결과 Cl^- 이온이 시멘트 경화체 속으로 침투함으로써 생성된 프리델스 솔트염, SO_4^{2-} 이온의 영향으로 생성되는 석고 및 에트링가이트, 한랭지역의 콘크리트가 해수의 침식으로 생성된 싸우마사이트, Mg^{2+} 이온과 시멘트 수화물의 반응으로 생성된 부루사이트등의 반응생성물이 생성은 되었다. 특히 A, B 및 D구조물에서는 프리델스 솔트염의 피크가 약간 크게 확인되었다.
- (4) 해안매립지에 위치한 구조물의 미세 조직을 분석한 결과, 콘크리트 표면의 부위를 확대 촬영한 것으로서 염화물과 황산염의 침투에 의해 에트링가이트(Ettringite), 프리델솔트염(Friedel's salt) 및 석고(Gypsum) 등의 반응생성물이 생성되어 콘크리트를 열화 시킨 것을 알 수 있으나, 내측 부위에서 채취한 시편의 경우 시멘트 수화생성물인 수산화칼륨과 C-S-H 상이 치밀하게 조직을 형성하고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Jan P. Skalny, "Materials Science of Concrete.", The American Ceramic Society. Inc, 1989.
2. ACI Committee 222, "Corrosion of Metals in Concrete.", ACI Journal, Jan.-Feb., 1985.