

염분침투에 의한 해안 콘크리트 구조물의 철근부식에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Corrosion of Reinforcing Steel
in a Coastal Concrete Structure due to the Attack of Chloride Ions

안 성 섭^{*} 김 은 겸^{**} 신 치 범^{***}
An, Seong Seob Kim, Eun Kyum Shin, Chee Burm
조 원 일^{****} 이 윤 한^{*****}
Cho, Won Il Lee, Yun Han

ABSTRACT

One of the principal causes of the deterioration of coastal concrete structures is the corrosion of reinforcing steel induced by the attack of chloride ions. An experimental study was performed to investigate the distribution of concentration of chloride ions in a coastal concrete structure and to measure the half-cell potential of embedded steel by using the copper-copper sulfate reference electrode. Quantitative analysis showed that the concentration of chloride ion in the aqueous phase near the surface of embedded steel exceeded a threshold value for corrosion, 0.05% by weight in concrete. The absolute value of half-cell potential at some members of embedded steel was measured to be higher than 350mV, indicating that the probability of corrosion is more than 90%. The prediction on corrosion based on the experimental measurements was confirmed by the observation of corrosion on the surface of steel bars in the concrete core taken out of the concrete structure.

1. 서론

해안에 축조된 콘크리트 구조물은 여러 가지 환경요인에 의하여 조기열화가 일어날 수 있다. 특히 해수중에 존재하는 염분은 해안구조물의 열화를 일으키는 대표적인 원인이다. 염분은 콘크리트 구조물

-
- * 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 석사과정
 - ** 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
 - *** 정회원, 아주대학교 화학공학과 교수
 - **** 정회원, 한국과학기술연구원 책임연구원
 - ***** 정회원, 도화종합기술공사 항만부 전문이사

내부로 침투해 철근주위에 형성되어 있는 부동태피막을 파괴하여 활성태의 macrocell을 형성하고, 세공을 통해 확산되어 들어오는 산소와 함께 철근 부식을 심화시킨다. 철근은 부식이 진행되면서 부피 팽창을 수반하며 콘크리트의 균열을 유발한다. 이 균열사이로 부식인자의 공급이 원활해져 철근부식이 가속되며, 콘크리트 구조물의 수명을 단축시키는 결과를 가져온다. 본 논문에서는 사용연수가 30년 경과된 해양 환경하에 있는 콘크리트 교량의 슬래브, RC PILE 및 SUPPORT BEAM에 대해 세공경, 염분함량 및 자연전위 등을 조사하여, 콘크리트 내부에서의 염분이동, 농축특성 및 철근부식을 평가하고자 한다.

2. 실험개요

본 연구에서는 철근부식의 주된 요인인 염분이동특성을 조사하기 위하여 세공경, 중성화시험을 시행하였으며, 염분함량시험을 실시하기 위해 콘크리트 코어 시험체를 두께 20mm로 절단하여 각 시험편의 전염분 및 가용성염분을 정량분석하였다. 세공경시험은 poreSIZER9320 mercury porosimeter를 사용하였고, 중성화는 1% 페놀프탈레인용액을 분무하여 조사하였다. 각 부재별 염분함량은 ASTM C 114에 준하여 「Potentiometric Titration」을 통해 분석하였다. 또한 각 부재에 대한 철근의 부식정도는 ASTM C 876에 의거하여 조사 및 평가를 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 세공특성

시멘트 경화체와 같은 다공성 재료의 세공 구조는 복잡한 형태를 갖고 있고 형상도 매우 다양하다. 세공경분포 및 공극률은 중성화와 염분의 침투에 직접적인 영향을 미친다. 표1.은 각 부위별 세공특성 및 압축강도의 관계를 보여주고 있다. 이 표로부터 콘크리트의 세공량은 내측에 비하여 표면부 쪽이 큰 값을 나타내고 있으며, 이 현상은 SUPPORT BEAM(교각 코핑 부를 지칭함)에서 더욱 현저하다. 또, 세공량은 SUPPORT BEAM의 경우가 가장 크며, 그 값은 슬래브의 약 2배, RC PILE의 2.5배 정도를 나타내고 있다. 이들 세공량은 콘크리트의 압축강도와 상관성이 있으며, 세공량이 클수록 강도는 저하되고 있음을 알 수 있다.

이상의 사실로부터 콘크리트 세공량이 크면 콘크리트 품질이 저하되며, 또한 세공을 통하여 외부로부터 콘크리트 내구성에 나쁜 영향을 미치는 인자, 즉 염분 및 CO² 등의 침입이 쉬워지게 된다. 특히, 장기간 해양환경하에 놓여진 콘크리트 구조물의 세공특성은 염분침투에 의한 철근발전에 상당한 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3.2 염분이동 및 농축

그림1.~그림4.는 각 부재에 대한 콘크리트 내부의 전염분과 가용성염분의 농도분포를 나타낸 것이다. 그림1. 및 그림2.로부터 RC PILE의 염분은 표면부에서 가장 크고, 내부로 갈수록 점차 작아지고

표1. 콘크리트 세공특성 및 압축강도

부위	세공량 (ml/g)		압축강도 (kg/cm ²)
	표면부	내측	
RC PILE	0.0365	0.0341	322
SUPPORT BEAM	0.0918	0.0674	197
슬래브	0.0447	0.0448	241

있으며, 이런 경향은 비말대나 해수중의 모든 경우에서 동일하게 나타나고 있다. 염분의 농도분포가 이와 같이 곡선적으로 나타나고 있는 것은 대기중 또는 해수중의 염분이 콘크리트 내부로 침투하여 확산, 이동되고 있음을 의미한다.

그림3의 SUPPORT BEAM의 경우, 염분이동현상은 RC PILE의 경우와는 달리 표면부 염분의 농도가 매우 작게 나타나고 있으며, 중성화가 진행된 깊이(20mm)에 인접한 내측에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 이와 같은 현상은 중성화에 의한 염분이동 및 농축이 일어난 결과로서 小林 등의 연구결과⁴⁾와도 일치한다. 즉, 콘크리트 내부로 이산화탄소가 침투하게 되면 콘크리트내의 수화생성물과 염화물의 흡착에 의해 생성된 고정염은 분리되어 가용성염으로 해리된다. 따라서, 중성화영역에서는 가용성염의 농도가 증가하여 농도경사에 의해 콘크리트 내부로 염분확산이 일어나게 되며, 결국 중성화영역의 염분량은 감소하게 된다.

그림4는 슬래브의 염분침투 및 이동특성을 나타낸 것이다. 슬래브의 경우는 염분의 농도분포가 위치에 따라 불규칙적으로 변하고 있다. 슬래브 상면의 콘크리트는 중성화 영역에서 염분이동이 일어났음을 알 수 있으며, 하면의 경우는 중성화가 30mm정도 진행하였음에도 불구하고 염분이동이 일어나지

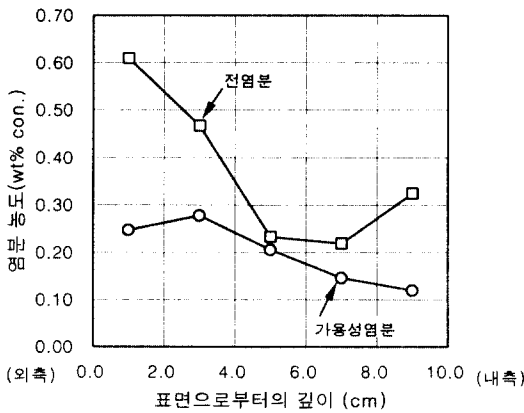


그림1. 염분농도분포(PC PILE 비말대)

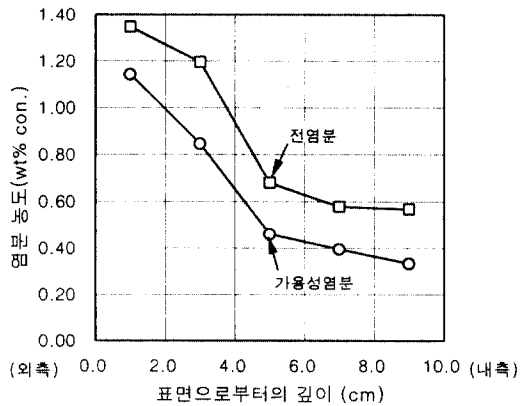


그림2. 염분농도분포(PC PILE 해수중)

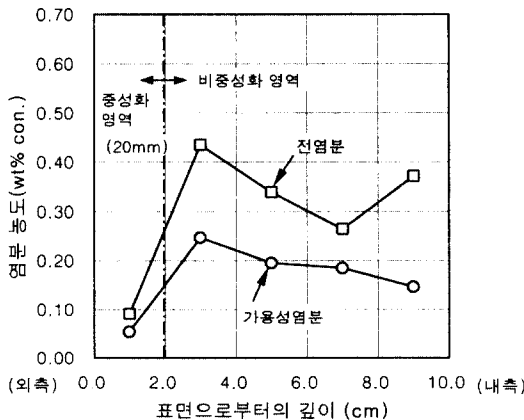


그림3. 염분농도분포(SUPPORT BEAM)

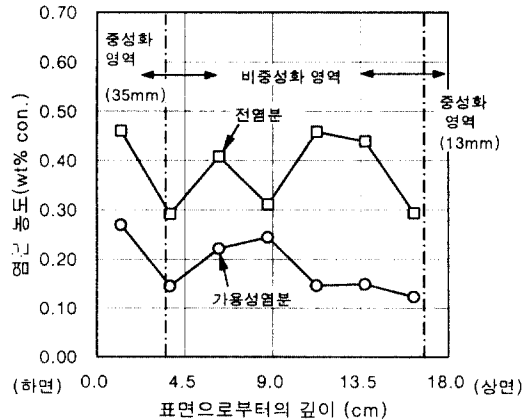


그림4. 염분농도분포(슬래브)

않고 있다. 하면의 중성화 영역에서 염분의 농도저하가 발생하지 않은 것은 岸谷 등의 연구⁵⁾에서 지적인 바와 같이 해사 사용에 의한 염분의 용출과 농축현상이 복합적으로 작용했기 때문인 것으로 생각된다. 슬래브의 경우 코아채취 당시 콘크리트에서 조개껍질이 발견되어 해사 사용이 확인되었고, 또 중성화가 진행되고 있는 점을 감안하면 그림(d)의 염분 분포는 岸谷의 연구결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.3 침입염분량의 고찰

표2.로부터 콘크리트의 염분침투량은 해수중의 RC PILE이 가장 큰 값을 가지며, 다음으로는 해수의 영향을 받는 비말대 RC PILE이고, SUPPORT BEAM과 슬래브는 거의 비슷한 값을 나타내었다. 철근의 발청을 일으키는 염분은 가용성염분이며, 콘크리트 중량의 0.05%를 초과하면 철근발청이 시작되는 것으로 알려져 있다¹⁾. 본 콘크리트 구조물은 가용성염분이 모두 철근발청 한계치를 초과하고 있으며, 해수중의 RC PILE은 최대 20배 이상, 평균치로 계산하더라도 12배나 큰 가용성염분을 포함하고 있다.

PILE은 74%로 분석되었으며, SUPPORT BEAM의 경우에는 60%, 슬래브의 경우는 50%로 분석되었다. 이상의 결과로부터 전염분에 대한 가용성염분의 비율은 해수중 RC PILE을 제외하면 대략 50~60%범위에 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 여러 문헌에서¹⁾²⁾⁶⁾ 제시하고 있는 값과 거의 일치하고 있으며, 따라서 본 콘크리트 구조물에 있어서도 염분의 이동이 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그러나, 해수중 RC PILE의 경우 전염분에 대한 가용성염분의 비율이 74%로 크게 나타난 것은 콘크리트의 고체상염은 일정한 한계 값에 도달하면 더 이상 고정되지 않는다는

연구결과⁴⁾와도 부합된다. 해수중 RC PILE은 다른 부위에 비하여 전염분의 경우 2.2~2.7배, 수용성염분은 3.0~3.3배 정도를 나타냄으로서 콘크리트에 다량의 염분이 침투되어 있음을 알 수 있다. 그러므로, 침투염분에 의해 고체상 염분은 이미 고정화 한계에 도달하였거나 그 값에 근접하므로써 가용성염분의 비율이 다른 부위의 콘크리트에 비해 크게 증가한 것으로 생각된다.

일반적으로 콘크리트의 공극율이 크면 염분침투가 쉬워진다. 본 연구대상 구조물의 경우, 앞에서 언급한 바와 같이 공극율이 큰 순서는 SUPPORT BEAM, 슬래브, RC PILE인데 대하여 표2.로부터 실제의 염분침투 현황은 SUPPORT BEAM과 슬래브는 거의 동일한 양상을 보이고 있지만, 해수중 RC PILE의 경우에는 많은 양의 염분이 침투해 있음을 알 수 있다. 이와 같이 공극율과 염분침투상황이 상반된 것은 RC PILE의 경우에는 해수의 직접적인 영향으로 염분의 침투가 크며, 슬래브 하면의 경우는 SUPPORT BEAM의 측면에 비하여 위치상 비래염의 침입이 원활한 데다 또 잔골재의 일부를 해사로 사용했기 때문인 것으로 생각된다.

표2. 콘크리트 1m³당 염분함유량(kg)

위치	전염분		가용성염분	
	최대치	평균치	최대치	평균치
RC PILE (비말대)	14.909 (0.609)	9.080 (0.371)	6.806 (0.278)	4.892 (0.200)
RC PILE (해수중)	33.014 (1.348)	19.924 (0.813)	27.998 (1.143)	14.719 (0.601)
SUPPORT BEAM	10.685 (0.436)	7.360 (0.300)	6.860 (0.280)	4.435 (0.181)
슬래브	11.266 (0.460)	9.175 (0.374)	6.605 (0.270)	4.558 (0.186)

()의 수치는 콘크리트에 대한 염분의 중량백분율(%)

3.4 철근 부식도 평가

앞에서 고찰한 바와 같이 본 콘크리트 구조물은 가용성염분이 콘크리트 중량의 0.05%를 훨씬 초과함으로서 철근의 발청이 일어나고 있는 것으로 예측된다. 따라서, 본 연구에서는 보다 상세한 철근발청상황을 조사하기 위하여 자연전위 측정을 실시하였으며, 그 결과를 토대로 Equipotential Contour Map을 작성하였다.

그림5는 CSE(황산동 전극)을 Reference로 선택한 자연전위 조사결과에 의한 비말대 RC PILE에서의 Equipotential Contour Map과 부재의 손상도를 나타낸 것이다. 비말대 RC PILE의 potential은 360~500mV로 측정되었으며, 부재 전면에 걸쳐 90%이상의 확률로 철근부식이 발생하고 있음을 나타내었다.

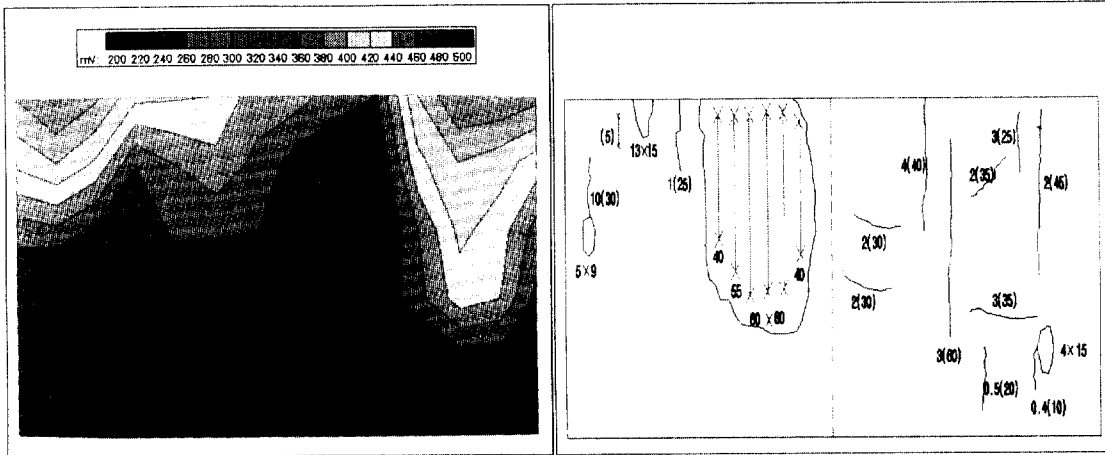


그림5 RC PILE의 Equipotential Contour Map과 손상도

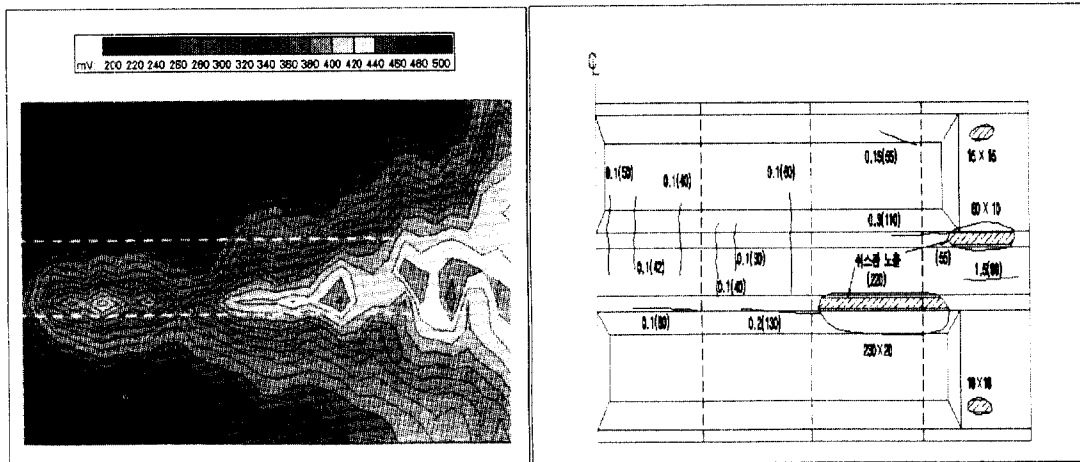


그림6 PSC보의 Equipotential Contour Map과 손상도

그림6.은 PSC보의 Equipotential Contour Map과 손상도를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 PSC보의 하면은 전반적으로 철근부식이 진행되고 있으며, 특히 지점부에서는 콘크리트 박리에 의한 철근 및 PSC강선의 노출과 균열 등으로 인하여 400~450mV의 potential을 나타내고 있으며, 이 결과는 손상도의 상태와도 서로 일치한다. 또한, SUPPORT BEAM의 경우에 있어서도 potential이 하면부위에서 350mV 이상의 값을 나타내었다.

이상의 고찰 결과로부터 철근의 부식이 가장 심한 곳은 비말대 RC PILE이며, 이 부분에서 많은 염분이 분석되고 있는 사실과도 일치한다. 또한 PSC보의 지점부 및 SUPPORT BEAM의 하면부위에 있어서도 potential이 크게 측정됨으로서 이 부분의 철근 부식이 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 사용년수가 30년이 경과한 해양환경하에 있는 콘크리트 구조물의 염분이동특성과 철근부식에 대하여 고찰한 것이다. 이상의 연구에 의하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. RC PILE의 염분농도분포는 곡선형태를 나타냄으로서 전형적인 확산이 일어나고 있음을 알 수 있다. 그러나 SUPPORT BEAM은 표면부 콘크리트의 중성화로 염분 이동 및 농축에 의해 표면부 염분이 적게 분석되었다. 또한, 슬래브의 경우는 중성화 진행 및 해사 사용 등의 영향으로 염화물이 온 농도는 위치에 따라 불규칙적으로 변하고 있음이 확인되었다.
2. 전염분에 대한 가용성염분의 비율은 해수중 RC PILE의 경우 74%를 나타내었으며, 그 외의 위치에서는 대략 50~60%의 값을 나타내었다. 특히, 해수중 RC PILE의 가용성염분 비율이 큰 것은 다량의 침입에 의해 염분의 고정화가 한계값에 도달하였기 때문인 것으로 생각된다.
3. 해수중 RC PILE은 공극율이 비교적 작은 데도 불구하고 많은 양의 염분이 침투해 있는 것은 해수의 영향 때문이며, 공극율과는 반대로 슬래브의 염분이 SUPPORT BEAM에 비해 큰 것은 슬래브 하면이 SUPPORT BEAM 측면에 비하여 위치상 비래염의 침입이 쉽고 또 해사의 사용에 기인한 것으로 생각된다.
4. 가용성염분은 모든 부재위치에서 철근발청 한계치인 0.05%를 훨씬 초과하고 있으며, 또한 자연전위 조사결과 비말대 RC PILE의 potential은 부재 전체에 걸쳐 360~500mV, PSC보의 경우는 지점부에서 400~450mV의 potential을 나타냄으로서 부식이 상당히 진행되고 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. S. Diamond, *Chloride Concentrations in Concrete Pore Solutions Resulting from Calcium and Sodium Chloride Admixtures*, Cement, Concrete and Aggregates. Vol.8, No.2, 1986, p.p.97~102
2. Vagelis G. Papadakis, *Physicochemical Processes and Mathematical Modeling of Concrete Chlorination*, Chemical Eng. Sci., Vol.51, No.4, p.p.505~513
3. ASTM C 876, *Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete*
4. 小林一輔, 白木亮司, 河合研至, 「炭酸化によって引き起こされる中の鹽化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮」, 日本コンクリート工學論文集, Vol.1, No.2, 1990, p.p.69~82
5. 岸谷孝一, 櫻野紀元, 「海砂を用いたコンクリートの鹽分の移動」, 日本コンクリート工學年次講演會 講演論文集, Vol.2, 1980, p.p.1~4
6. 染谷健司, 大郎信明, Tiong-Huan Wee, 長瀧重義, 「セメント硬化体中における鹽素イオンの固定化性状」, 日本コンクリート工學年次論文報告集, Vol.11, No.1, 1989, p.p.603~608