



02

해양 환경하 소파공 블록(TTP)의 성능기반 염해 내구성 평가

Evaluation of Performance Based Chloride-induced Durability for Tetra-pod Blended Concrete in Marine Environment

이창홍 Chang-Hong Lee
포스코건설 R&D센터/TA.그룹
Manager

김락현 Rak-Hyun Kim
포스코건설 R&D센터/TA.그룹
Associate

안기용 Ki-Yong Ann
한양대학교
건설환경플랜트공학과 교수

1. 머리말

각종 결합재를 혼입한 다성분계 혼합 콘크리트의 사용은 고내구성 콘크리트로의 설계 및 시공 확대에 큰 영향을 끼치고 있다. 특히, 이러한 시멘트 대체재의 추가적인 사용은 기존의 일반 콘크리트에 비해 내구성 및 경제성 부분에서 월등한 향상 효과를 가져다 주는 것으로 알려져 있으며, 이는 결합재의 충전 효과에 따른 밀실효과 및 외부 유해 이온의 침투 저하 효과에 기인한 것으로 알려져 있다. 그러나 상기의 혼합 콘크리트를 조수 간만의 차가 크고, 파랑에 의한 침식이 큰 해상에 직접적으로 노출시킬 경우 콘크리트의 열화 속도가 결합재내의 화학 성분과 해수와의 이온 화학반응으로 인해 일반 콘크리트에 비해 더욱 가속화 될 수 있으며, 이는 기존의 이론에 큰 반향을 불러 일으킬 수 있다.

여기서, 해양 콘크리트 구조물의 열화는 크게 다음의 두 가지 항목으로 분류가 될 수 있는데, 첫째는 해수와 콘크리트 표면의 매트릭스내 화학 반응에 따른 재료열화(염해)를 말하며, 둘째는 파랑(파압, 조석, 바람 등) 침식에 따른 콘크리트의 물리적 마모 등으로 구분이 가능하다. 이는 종합적으로 콘크리트 구조물의 단면을 감소시켜 각종 해양 콘크리트 구조물의 구조적 건전성 및 내구성에 영향을 끼치게 된다.

본 고에서는 상기의 해양 콘크리트 구조물의 열화내용 중 Two-track으로 분류된 1단계의 현장 적용 연구 결과를 제시하고자 하며, 향후에 2단계 현장 실험평가 내용이 완료되어지면 종합적인 결과를 후속으로 제공하여 각종 해양콘크리트 구조물의 내염해성/내마모 저항성 평가를 위한 기초 자료로서 제시하고자 한다(사진 1, 2).

2. 국내외 기술 동향

현재까지 다성분계 혼합 콘크리트의 사용 및 염해 저항성의 평가와 관련된 연구는 국내외적으로 무수히 많았으나^{1~4)} 파랑 침식에 따른 콘크리트의 물리적 마모 등을 포함하여 종합적으로 고려



사진 1. 인천지역 부지조성공사 현장 전경



사진 2. 해안 소파공 블록의 열화



(a) 해수 침지 반복구간 침지

(b) 해수 유입

(c) 환경 조건별 시험체 거치

(d) 실물 TTP 제작 및 양생

사진 3. 해양 환경용 혼합 콘크리트 공시체 및 소파공 블록의 준비

3. 혼합 콘크리트 소파공 블록의 염해 내구성 평가

3.1 성능평가 개요

본 성능기반 해양 콘크리트 구조물의 내염해성/내마모 성능 평가에서는 Two-track의 실험 평가 단계를 기획하고, 2년간에 걸친 중/장기 침지 열화 모니터링을 수행 중에 있다. 본 고에서는 1단계 내용으로써 혼합 콘크리트 소파공 블록의 염해 내구성 평가를 제시하고자 한다. 1단계 성능평가 내용은 ① 역학적 특성 평가, ② 염분 침투시험 및 ③ 염해 내구수명 계산 등으로 구성된다 <사진 3>.

한 연구사례는 극히 드물다. 이는 콘크리트내의 화학적 재료 열화뿐만 아니라 물리적 파랑 침식에 따른 열화의 영향인자 도출에 있어서 복잡한 변수들이 준비하기 때문이다. 여기서, 재료 열화의 경우에는 크게 설계 기준 강도, 외기 온도, 해수 온도, 물/결합재비(W/B), 혼화재 치환률, 시험체 크기, 담수 및 해수의 영향 등을 들 수 있으며, 2단계에서는 풍속, 파압(와류 속도), 조수 간만차(반복 습윤) 등을 들 수 있다. 또한, 추가 사항으로 무게 감량법에 의한 콘크리트 구조물의 마모량 전/후 비교를 실시할 경우 해조류(이끼, 따개비) 등의 침적량 및 파압 작용 하중 방향 등의 조건 등도 변수로 도출이 가능한 것으로 판단된다.

3.2 역학적 특성 평가

<그림 1>은 혼합 콘크리트로서 [80OPC + 20FA]와 [80SC + 20FA]의 수중 양생에 따른 7일 및 28일에서의 압축강도 실험결과를 도시하였다. 각 배합에 대해 3개의 동일 시편의 평균값을 측정하였으며, 실험 결과 7일 재령에서는 [80OPC + 20FA]의 경우가 [80SC + 20FA]의 경우에 비해 높은 압축 강도 값을 가지고 있었으나 재령 28일에 있어서는 28.4 MPa의 [80SC + 20FA]가 26 MPa의 [80OPC + 20FA]보다 우위에 있는 것으로 나타났다. 동일 배합 조건에서 고로슬래그미분말의 혼입 유무가 변수였기 때문에 고로슬래그미분말의 잠재수경

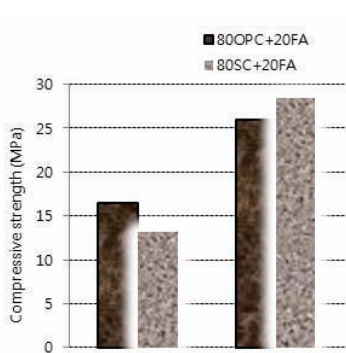


그림 1. 수중양생시 압축강도

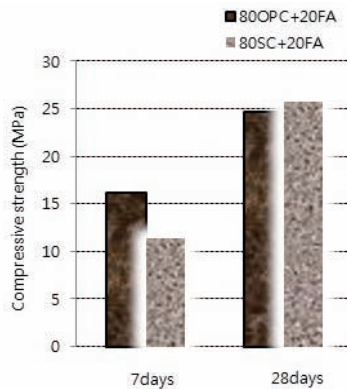


그림 2. 해수양생시 압축강도

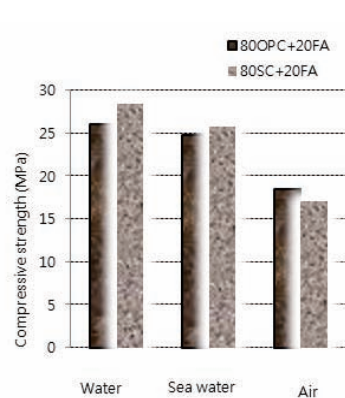


그림 3. 양생 조건에 따른 비교

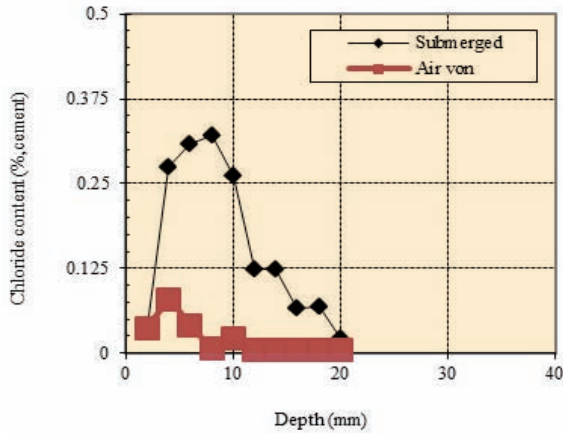


그림 4. 해양 폭로 소파공 블록(80SC+20FA)의 염소이온량 측정 결과

성 반응에 의한 초기강도 저하효과가 적용되어진 사항이라 판단되나 이후 일정 기간의 양생시간을 확보하면서 종래의 혼합 콘크리트로서의 역학적 특성을 제대로 발현한 것으로 판단된다.

한편 <그림 2>는 해수 중에서 양생시킨 [80OPC+20FA]와 [80SC+20FA]의 재령에 따른 압축강도 결과를 도시하였다. 실험 결과의 전체적인 거동은 앞의 수중 하에서 양생시킨 경우와 크게 다르지 않다. 즉, 7일의 초기 재령의 경우에는 [80OPC+20FA]가 우위에 있었고, 28일의 경우는 [80SC+20FA] 배합의 경우가 우위로 나타나는 것을 확인하였다. 다만, 여기서 주목할 만한 점은 재령 28일에서의 두 배합간의 강도 차이가 기

술했던 수중 양생에 비해 확연히 줄어들었다는 점을 관찰할 필요가 있다. 이는 28일 재령에서의 수중 양생의 경우 $[80OPC+20FA] / [80SC+20FA] = 91.5\%$ 로 나타난 반면(그림 3), 해수 양생의 경우 $[80OPC+20FA] / [80SC+20FA] = 96.1\%$ 로 나타나 상대적으로 해수침지 양생에 따른 강도 저감 효과를 발휘하였다고 달리 해석이 가능하다. 이는 기존의 정설에 다분히 역행하는 결과라 할 수 있는데, 혼합 콘크리트의 경우 조수 반복에 따른 해수환경 하에서 초기 양생을 실시하여 보고한 사례가 드물고, 일반적인 해상 침지 구조물의 경우에도 콘크리트 타설 후 일정 재령 기간이 지난 후 거푸집을 제거하는 등 해수에 직접 노출시킨 압축강도 데이터의 부재에 기인한 것이라 판단이 되며, 향후 매우 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

3.3 혼합 콘크리트 소파공의 염분 특성 분석

<그림 4>에서는 실제 해양에 침지되어 표면 열화가 발생된 [80SC+20FA] 배합의 소파공 블록의 깊이별 염소 이온 침투 결과를 도시하였다. 타설 후 약 1년 3개월이 경과한 시점에서의 측정값은 동일 소파공 블록내에서 침지 구간과 대기 노출구간의 두곳 모두 부식 임계치인 시멘트 중량당 0.3%에 미달하고 있음을 확인할 수 있으며, 또한 해수 내 염소 이온의 유입이 콘크리트 시편 깊

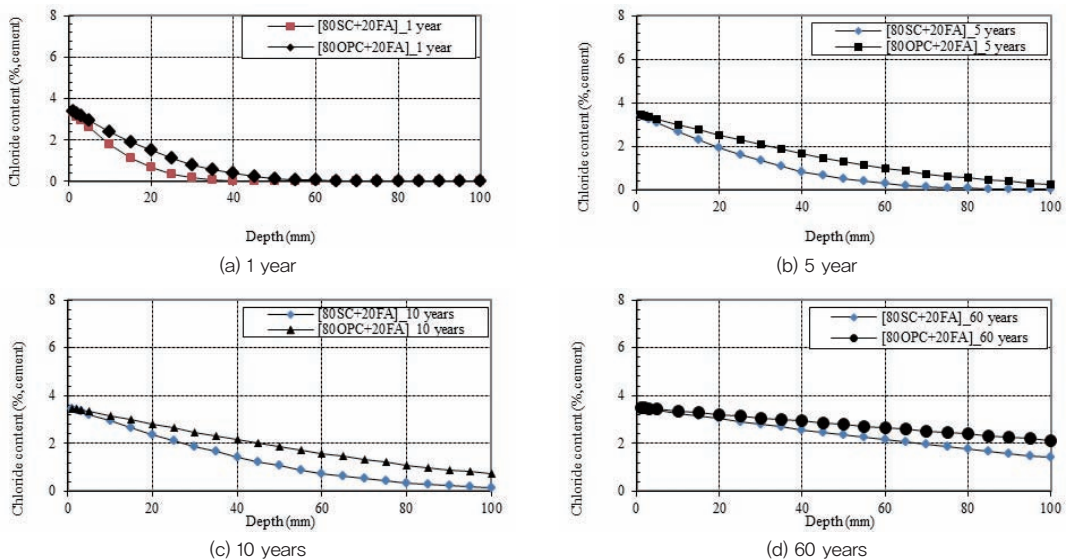


그림 5. 80OPC+20FA와 80SC+20FA의 염소이온농도 분포 이력 예측

이 20 mm 이상에서는 초기 내재 염분량 수준으로 수렴하고 있음을 확인하였다. 따라서 본 소파공 블록은 내구적으로 염해에 대해 안정하다고 판단된다.

4. 혼합 콘크리트 적용시 소파공 블록의 염해 열화 저항성 평가 및 내구수명 예측

4.1 염소이온 침투 깊이 예측을 통한 열화 저항성 평가

〈그림 5〉는 해당 콘크리트 소파공 블록의 1, 5, 10 및 60년 시간대에서의 염소 이온농도 분포 이력 예측 결과를 도시하였다. 여기서, 해석상의 인자와 관련하여서는 Song(2008) 등의 연구를 통한 정상 상태의 확산 계수 및 시멘트 중량에 따른 3.5%의 표면 염소이온농도를 기반으로 하여 혼합 콘크리트 배합 특성에 따른 거동을 예측하였다. 〈그림 5-(a)〉에서 재령 1년에서의 염분 농도는 아래와 같이 도시되었다. 즉, 각 배합에 따른 특정 깊이에서의 염소이온농도는 전체적으로 [80SC + 20FA]의 경우가 [80OPC + 20FA]의 경우에 비해 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 다시 말해 [80SC + 20FA]의 경우가 염해 열화에 대해서 [80OPC + 20FA]에 비해 더욱 저항성을 확보하고 있음을 제시한다고 할 수 있다. 이러한 경향은 〈그림 5-(b)〉의 재령 5년의 경우, 〈그림 5-(c)〉의 재령 10년의 경우 및 〈그림 5-(d)〉의 60년의 경우에서도 전반적으로 유사한 거동을 보인다고 할 수 있다.

4.2 콘크리트 피복두께에 따른 내구수명 산출

〈그림 6〉은 [80OPC + 20FA] 및 [80SC + 20FA]의 내구수명 예측 결과를 도시하였다. 내구수명의 산출을 위한 피복두께의 임계치는 해양 콘크리트 구조물의 최소 피복두께인 100 mm를 가정하여 콘크리트 최외각 표면에서 내부로 100 mm 도달 깊이까지를 역산하여 결과를 도출하였다. 즉, 해석 결과로부터 [80SC + 20FA]의 경우는 100 mm 도달 깊이까지의 시간이 21.2년으로 계산되었으며, 반면 [80OPC + 20FA]의 경우 7.9년으로 계산되어 약 2.68배 내구수명을 연장하고 있음을 확인하였다.

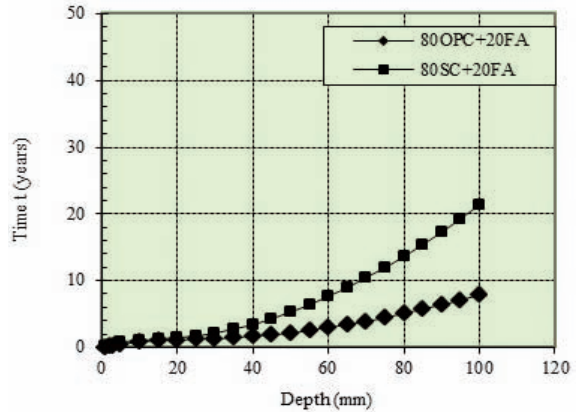


그림 6. 혼합 콘크리트 소파공 블록의 내구 수명 예측

5. 맺음말

그간 콘크리트/콘크리트 구조물의 염해 열화와 관련된 현장 적용 연구는 염소이온의 침투 및 확산에 기반한 내구성 저하 연구가 주를 이루어 왔으며, 실제 콘크리트 구조물이 거처되는 현장 조건의 경우는 기존의 염해 열화 외에 파랑 침식등에 의한 물리적 마모 손상 등이 추가적으로 고려되어야만이 보다 정확한 열화평가를 가능케 할 것으로 판단된다.

본 고에서는 1차 현장실험 평가로써, 서해안 지역의 해상 위에 설치된 콘크리트 소파공 블록의 염해에 따른 내구 열화 현상을 콘크리트 재료 내구성 평가 관점에서 실험 및 해석적 방법으로 접근하여 침투 확산 속도를 계산하고, 일반 콘크리트 대비 혼합 콘크리트 적용 시의 내구수명 예측을 혼합 콘크리트의 해수 침식에 따른 열화 저항성으로 평가하고자 하였으며, 향후에 2단계 현장 실험평가 내용이 마무리되면 종합적인 결과를 후속으로 제공하여 각종 해양 콘크리트 구조물의 내염해성/내마모 저항성 평가를 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

아울러 최근 동남아, 중동 및 남미 지역의 대규모 해안 건설 프로젝트 수주의 증가와도 맞물려 관련 연구자들의 실용적인 해양콘크리트 구조물의 내염해성/내마모성능 향상 콘크리트 연구개발과 관련된 기술 경쟁력을 키워야 할 것이다. □

담당 편집위원 : 최규용(삼성물산(주)건설부문)
kyuyoung.choi@samsung.com

참고문헌

1. H.W. Song, C.H. Lee, and K.Y. Ann, "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments", Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2008, pp. 113 ~ 121.
2. M.J. McCarthy and R.K. Dhir, "Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction", J. Fuel, Vol. 84, 2005, pp. 1,423 ~ 1,432.
3. W.M. Zhang, H.J. Ba and S.J. Chen, "Effect of fly ash and repeated loading on diffusion coefficient in chloride migration test", Construction and Building Materials, Vol. 25, 2011, pp. 2,269 ~ 2,274.
4. M.D.A. Thomas and J.D. Matthews, "Performance of pfa concrete in a marine environment (10 year results)", Cement and Concrete Composites, Vol. 26, 2004, pp. 5 ~ 20.



이창홍 박사는 연세대학교 토목 공학과에서 혼합콘크리트의 염해 부식 저항성 및 균열치유 적용에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, 2011년부터 포스코건설 R & D센터 Technical Advice 그룹에 재직 중이다. 주 관심 분야는 성능기반 혼합 콘크리트 내구성 평가, 초고성능 콘크리트 개발, 철근부식 및 균열치유 기법 개발, 극한지 환경하 콘크리트 시공기법 개발 등이다.
changhong@poscoenc.com



김락현 Associate는 중앙대학교 건설환경공학과를 졸업한 후 포스코건설 R & D센터 Technical Advice 그룹에 입사하여 콘크리트 분야 현장 기술지원 업무를 담당하고 있으며, 주로 매스콘크리트의 수화열 평가, 성속도 기법을 활용한 최적 양생시스템 구축, 염해 내구성 평가와 관련된 기술지원 업무를 수행하고 있다.
rhkim0121@poscoenc.com



안기용 교수는 영국 Imperial College 건설환경공학과에서 콘크리트의 철근부식 임계 염화물 농도에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, 현재 한양대학교 건설환경플랜트공학과 교수로 재직중이다. 주로 콘크리트의 내구성 및 환경 영향성 평가에 관한 연구를 수행하고 있다.
kann@hanyang.ac.kr