

해수에 노출된 콘크리트내의 철근부식 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Corrosion of Steel in Concrete Exposed to Seawater

오 병 환 * 장 봉 석 ** 장 승 업 ** 박 대 균 ***

Oh, Byung Hwan Jang, Bong Seok Jang, Seung Yup Park, Dae Gyun

ABSTRACT

In this study, the characteristics of concrete strength according to age/curing condition and the penetration mechanism of seawater into the concrete has been studied. To this end, a comprehensive experimental program has been setup. The major test variables include the type of cement and the type of mineral admixture. The strength test as well as corrosion test have been conducted to explore the effects of chloride ion penetration on the properties of concrete.

The experimental results and the developed theory in the present study can be efficiently used to analyze the chloride ion penetration and to estimate the durability of concrete structures.

1. 서론

사회 기반 시설물로서의 토목구조물은 특히 해수 환경에 노출되는 구조물은 내구수명의 예측과 연장방안의 필요성이 절실하며 현재 이에 대한 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 많은 연구들은 각 연구에서 사용하는 배합과 노출 환경에 따라 서로 상이한 결과를 나타내는 경우가 많으며 따라서 실제 현장 사용 배합들에 대한 각종 실험 연구는 필수적이라고 하겠다.

본 연구에서는 현재 국내 원전 구조물에 사용하고 있는 배합을 사용하여, 해수에 노출된 콘크리트 구조물에서 콘크리트의 강도특성, 염소이온의 침투 실험 그리고 염소이온의 확산계수 측정을 통한 해석을 통한 철근 부식 시점 예측 연구를 수행하였다.

2. 실험 변수 및 실험 방법

해수에는 여러 가지 이온들이 존재하고 있으나 NaCl의 형태로 존재하는 Cl^- 이온이 철근의 부식에 가장 큰 영향을 미치므로 해석과 분석의 단순화를 위하여 NaCl 5% 용액을 사용하여 각종 특성 실험을 수행하였다.

*정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

**정회원, 서울대학교 연구원

***서울대학교 대학원 토목공학과

2.1 실험 변수

본 연구에서는 해수에 노출된 콘크리트의 강도특성 및 철근부식 시점 예측을 위하여 재령(14일, 28일, 56일, 6월)과 양생조건에 따른 압축강도 실험을 수행하였고, 해석에 사용하기 위하여 재령 28일과 90일에서 염소이온 투과 실험을 수행하여 염소이온의 확산계수를 도출하였으며 그리고 염소이온 침투실험 등을 수행하였다. 실험 변수는 표.1에 나타내었다.

표.1 각 변수별 배합표 (1차 실험 / 2차 실험)

실험 변수	시멘트 (kg/m ³)	혼화재(kg/m ³)		물 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)	SP (%)
		FA	BS				
N*	430	-	-	170	972	705	0.5
NB*	301	-	129	170	972	705	0.5
NF*	301	129	-	170	972	705	0.5
V*	430	-	-	170	972	705	0.5
VB	301	-	129	170	972	705	0.5
VF	301	129	-	170	972	705	0.5

*: 1차실험에 사용한 변수

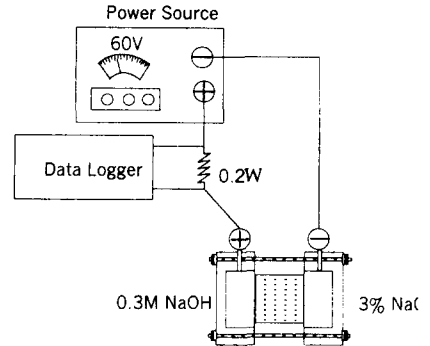


그림.1 염소이온 투과시험 장치도

2.2 실험방법

2.2.1 강도 및 염소이온 침투 실험

해수에 노출된 콘크리트의 강도 특성 규명을 위하여 재령 14일까지 표준 양생한 후, 일부는 NaCl 5% 수용액에서 양생하여 재령 28일, 56일, 6월에서 압축 강도를 표준 양생 공시체와 비교하였다.

염소이온 침투실험은 ASTM G 109에 규정되어 있는 방법을 이용하여 철근 순토크를 2cm로 하여 2주일 간격으로 철근의 자연전위를 측정하여 부식전위에 도달시 표면에서 염소이온의 침투깊이에 따른 농도를 측정하였다.

2.2.2 염소이온 확산계수 측정

T.Zhang과 O.E.GjØrv 등에 의해 제안된 전기적 방법은 기본적으로 투수성 평가에 사용되는 염소이온 투과시험(ASTM 1202-91, 그림.1)과 동일한 실험방법이다. 이들의 연구에 따르면 염소이온 투과시험법에서의 전위차에 의한 염소이온의 이동이 온도, 전위차와 농도차의 함수로 나타나기 때문에 확산계수 D_c 는 아래 식과 같은 형태로 주어진다.

$$D_c = \beta_0 \frac{300kT}{\epsilon e_0 \Delta\psi} \frac{LV}{C_0 A_0} \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

여기서, β_0 : Boltzman 상수(1.38×10^{-16} ergs/K)

T : 절대온도(K)

L : 시편의 두께(cm)

V : NaOH용액이 담긴 셀의 부피(cm³)

C_0 : NaCl의 농도(mol/l)

A_0 : 시편의 면적(cm²)

ϵ : 이온의 원자간

e_0 : 전자의 전하량(4.8×10^{-10} e.s.u)

$\Delta\psi$: 전위차(Volt)

dC/dt : 염소이온의 농도증가율(mol/l/sec)

위 식으로부터 일정온도와 일정전위차로 염소이온 투과시험을 수행한다면 양극셀(anode cell)에서의 염소이온의 농도증가율(dC/dt)을 제외한 모든 변수가 일정한 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 즉,

$$D = \beta \cdot \alpha \cdot \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

여기서, $\beta = \beta_0 \frac{300k}{\epsilon e_0}$: 상수항, $\alpha = \frac{TLV}{\Delta\psi C_0 A_0}$: 실험조건변수

따라서 양극셀에서의 염소이온농도의 변화율을 측정함으로써 확산계수를 계산할 수 있다. 이 실험은 정상상태(steady-state)의 실험이므로 이로부터 결정되는 확산계수는 이온의 구속을 고려하지 않은 확산계수가 된다는 점을 주지해야 한다. 농도의 측정은 실험 도중에 양극셀에서 계속해서 시료를 채취하기 힘들기 때문에 매우 까다로운 작업이 된다. 따라서, 본 연구에서는 주로 전류를 측정하여 이로부터 투과농도를 간접적으로 구함으로써 이러한 어려움을 극복하고자 했다. 이는 염소이온외에 다른 종류의 음이온(OH⁻ 등)이 염소이온의 농도에 비해 상대적으로 매우 작게 함유되어 있다고 가정할 수 있기 때문에 가능해진다.

3. 실험 및 해석결과

강도실험 결과는 표.2 및 그림.2에 나타내었으며, 염소이온 확산계수 측정결과는 표.3에 나타내었다.

표.2a 강도실험 결과(1차 실험) (kg/cm²)

변수	N		NB		NF		V	
	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생
14일	434		390		409		391	
28일	474	445	459	433	491	460	455	454
56일	513	512	542	521	528	553	545	566
6월	547	563	580	558	581	584	597	-

표.2b 강도실험 결과(2차 실험) (kg/cm²)

변수	N	NB	NF	V	VB	VF
28일	471	378	438	431	439	347
90일	550	551	531	533	555	471

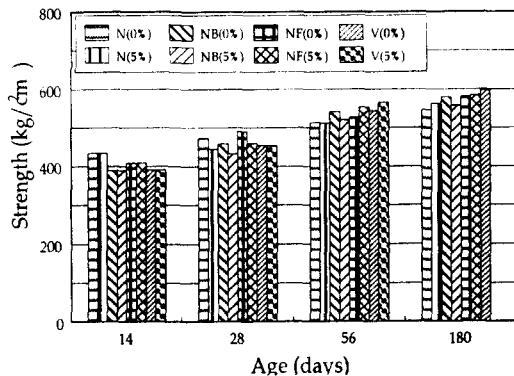


그림.2 각 변수의 재령별 강도비교

표.3 각 변수별 확산계수(1차 실험)

변수명	Slope (mol/l/sec) ($\times 10^{-6}$)	Diffusivity ($\times 10^{11}$ m ² /sec)	Effective Diffusivity ($\times 10^{12}$ m ² /sec) (0.55D)	Average
N	7.6	18.9	10.4	9.93
	6.9	17.2	9.47	
NB	5.0	12.5	6.85	6.06
	3.8	9.56	5.26	
NF	1.5	3.85	2.12	2.00
	1.4	3.41	1.88	
V	6.3	15.7	8.64	7.93
	5.3	13.1	7.23	

표.4a 변수별 확산계수, 재령 28일(2차 실험)

변수명	Slope (mol/l/sec) ($\times 10^{-6}$)	Diffusivity ($\times 10^{-11}$ m ² /sec)	Effective Diffusivity ($\times 10^{-12}$ m ² /sec) (0.55D)
N	11.4047	2.85	15.7
NB	10.0011	2.50	13.7
NF	5.36639	1.34	7.37
V	15.2133	3.80	20.9
VB	5.06972	1.27	6.96
VF	14.8894	3.72	20.4

표.4b 변수별 확산계수, 재령 90일(2차 실험)

변수명	Slope (mol/l/sec) ($\times 10^{-6}$)	Diffusivity ($\times 10^{-11}$ m ² /sec)	Effective Diffusivity ($\times 10^{-12}$ m ² /sec) (0.55D)
N	6.65500	1.66	9.14
NB	5.70306	1.42	7.83
NF	4.58083	1.14	6.29
V	8.69806	2.17	11.9
VB	5.09028	1.27	6.99
VF	5.26667	1.31	7.23

표.5 각 변수의 부식시작 예상년수

변수명	부식시작 예상년수 (년)	비고
1차 실험(90일)		
N	36.762	1.39
NB	56.855	1.97
NF	162	3.33
V	44.671	2.13
2차 실험(28일)		
N	25.901	1.0
NB	28.819	1.0
NF	48.636	1.0
V	20.956	1.0
VB	51.173	1.0
VF	22.608	1.0
2차 실험(90일)		
N	39.468	1.52
NB	45.175	1.58
NF	54.959	1.13
V	31.592	1.51
VB	49.975	0.98
VF	48.485	2.14

4. 결론

1. 해수에 노출된 경우와 노출되지 않은 경우, 재령에 따른 강도의 변화는 크게 나타나지 않고 있으며 강도의 크기가 유사하고 특별한 상관관계를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 이는 해수에 침지된 콘크리트의 경우 초기 몇 년 내에는 강도에 미치는 영향이 크지 않음을 나타내고 있다.
2. 염소이온의 확산계수를 측정된 결과 재령 90일에서 플라이애쉬를 혼입한(NF) 배합이 가장 작은 확산계수를 나타내었다. 이는 플라이애쉬의 포졸란 반응으로 내부조직이 치밀해져서 나타낸 결과로 설명될 수 있다.
3. 해석을 통하여 현재 사용중에 있는 철근콘크리트 구조물의 철근부식이 시작되는 시작 시점까지의 내구수명을 예측한 결과 현재 20년이 경과한 구조물의 경우 내구수명이 약 25년 정도이고, 현재 6년 정도 경과한 구조물의 경우는 약 40년으로 나타나고 있으나 이것은 환경의 변

화와 실재재료의 장기 열화속도에 따라 영향을 받을 수 있으며 따라서 앞으로 재료특성이 장기적으로 변화되는 것을 고려하여야 하는 지속적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

4. 염소이온의 확산계수는 공시체의 제작 및 양생에 따라 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 최상의 배합일지라도 현장에서의 타설 및 양생관리에 따라 많은 변동성을 가질 것으로 예측되며, 이러한 부분에 대한 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 오 병환, 장 승엽, 차 수원, 이 명규, "염소이온의 확산모델에 의한 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 예측연구," 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집 제9권 1호, 1997년 5월, pp.254-260.
2. Clifton, J. R., "Predicting the Remaining Service Life of Concrete," National Institute of Standards and Technology, NISTIR 4712, Nov., 1991.
3. Schießl, P., "Corrosion of Steel in Concrete," Report of Rilem Report Technical Committee 60-CSC, Chapman & Hall, London, 1988.