

염소이온 확산계수의 확률변수 평가

Estimation of Probability Valuable for Diffusion Coefficient of Chloride Ion

배수호* 이광명** 김지상*** 정상화****
Bae, Su Ho Lee, Kwang Myong Kim, Jee Sang Jung, Sang Hwa

ABSTRACT

In recent years, many research works have been carried out in order to obtain a more controlled durability and long-term performance of concrete structures exposed to chloride environments. In particular, the development of new procedures for probability-based durability analysis and design has been proved to be very valuable.

To carry out the procedures described above, the statistical properties of design valuables such as diffusion coefficient of chloride ion, surface chloride concentration, and chloride threshold value etc. should be known. For this purpose, this paper presents the statistical properties of the diffusion coefficient of chloride ion such as mean value and standard deviation with water-cement(w/c) ratio and curing conditions, respectively.

It was observed from the test that the standard deviation for the diffusion coefficient of chloride ion was found to be small with decrease in the w/c ratio irrespective of curing conditions and that of standard curing was found to be smaller than that of field curing.

1. 서론

종래의 염해환경하에 있는 콘크리트 구조물의 내구성 설계 기법은 염소이온 확산계수가 시간에 따라 일정하다는 전제 하에, 콘크리트 내의 강재 위치에서의 염화물량이 임계 염화물량에 달할 때까지의 시간을 추정함으로써 내구수명을 평가하는 기법을 채택하였다. 그러나 최근 선진 외국에서는 염소이온 확산계수, 표면 염화물량 및 임계 염화물량 뿐만 아니라 염소이온 확산계수의 시간 의존성 지수 등 설계변수들의 통계적 성질을 고려하여 내구성 설계를 수행하는 확률론적 내구성 설계 기법이 이루어지고 있다. 이 같은 확률론에 기초한 콘크리트 구조물의 내구성 설계 기법은 상기의 설계변수들의 통계적 성질을 고려하여 각 설계변수의 내재적 불확실성이 체계적으로 포함되도록 하였으므로 매우 합리적인 설계법이라 할 수 있다. 따라서 국내에서도 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 설계를 위해서는 각 설계변수들의 통계적 성질 규명이 시급한 실정이다.

* 정회원, 안동대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

*** 정회원, 서경대학교 토목공학과 조교수

**** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 연구원

본 연구에서는 이에 대한 일환으로, 양생조건을 실내 표준양생과 현장 폭로양생으로 구분하여 물-시멘트비 50%, 41.5% 및 31.5%에 대해서 전기화학적 촉진실험법의 일종인 Tang & Nilsson 모델을 이용하여 염소이온 확산실험을 수행하였다. 결국, 이에 의하여 양생조건 및 물-시멘트비 각각에 따라 염소이온 확산계수의 평균치 및 표준편차 등의 통계적 성질을 평가하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 비중이 3.13인 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재는 각각 낙동강산(경북 안동시) 하천사 및 안동산 부순돌을 이용하였으며, 혼화제는 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 나프탈렌계의 고성능 AE감수제(표준형, K사)를 사용하였다.

2.2 실험방법

(1) 공시체 제작

콘크리트의 물-시멘트비 및 양생조건에 따른 염소이온 확산계수의 통계적 성질을 평가하기 위하여 콘크리트 배합실험을 하였는데, 목표 슬럼프는 18±2cm 및 21±2cm, 목표 공기량은 4.0±1.5%로 설정하여, 물-시멘트비 31.5%, 41.5% 및 50% 각각에 대해서 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라 원주형 공시체(ø100×200mm)를 제작하였다. 제작된 공시체는 성형 후 24시간 경과하여 몰드를 제거한 후 표준양생 공시체는 시험 전까지 20±3℃의 온도로 습윤양생 하였으며, 현장 폭로양생 공시체는 재령 14일까지 실험실(약 25℃)에서 기건양생 후 경북 영덕군 금곡리에 위치한 동해안의 비말대에서 시험 전까지 폭로양생 하였다.

(2) 실험방법

물-시멘트비별로 제작된 공시체에 대해 측정재령인 28일까지 양생한 후 전기화학적 촉진실험법의 일종인 Tang과 Nilsson 모델을 이용하여 확산실험을 수행하였는데, 콘크리트 시편의 두께는 50 mm로 하였으며, 음극셀은 3%의 NaCl 수용액을, 양극셀은 0.3M의 NaOH 수용액을 사용하였다. 이 같이 확산셀 장치를 구성한 후 전원공급장치를 이용하여 30V의 전압을 공급하였을 때 0.2Ω의 저항에 걸리는 전류와 확산셀 내부의 온도를 8시간 동안 측정하였다. 측정된 결과를 근거로 식 (1)에 의하여 염소이온 확산계수를 추정하였다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

여기서, $\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$

D : 염소이온 확산계수(m ² /s)	z : 이온의 원자가(염소이온의 경우 $z=1$)
F : 패러데이 상수(96,481.04 J/Vmol)	U : 양극과 음극 사이의 전압차(V)
R : 기체상수(8.314 J/Kmol)	T : 용액의 온도(K)
L : 시편의 두께(m)	x_d : 염소이온의 침투깊이(m)
t : 실험 지속시간	erf : error function

3. 결과분석 및 고찰

3.1 압축강도

그림 1은 양생조건에 따라 염소이온 확산계수의 통계적 성질을 평가하기 위하여 사용된 콘크리트의 물-시멘트비별 재령 28일의 압축강도를 나타낸 것으로, 양생조건에 관계없이 물-시멘트비의 감소에 따라 압축강도가 크게 증진되어 본 연구에 사용된 콘크리트의 품질은 양호한 것으로 나타났다. 한편, 표준양생한 콘크리트의 압축강도는 동해안 염해환경의 비말대에 폭로양생한 경우보다 다소 크게 나타났는데, 이것은 전자가 후자보다 일정한 온도하에서 수분이 충분히 공급되므로 콘크리트 수화반응에 유리하게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 평균 염소이온 확산계수

그림 2 및 표 1은 재령 28일의 공시체에 대해서 물-시멘트비 및 양생조건 각각에 따라 20개씩 측정된 염소이온 확산계수의 평균치를 나타낸 것으로, 물-시멘트비가 감소함에 따라 평균 염소이온 확산계수는 크게 작아지는 것으로 나타났는데, 이는 물-시멘트비가 작을수록 내부 공극이 적어서 염소이온의 침투·확산이 어려워지기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 동일 물-시멘트비의 경우, 표준양생한 공시체의 평균 염소이온 확산계수가 동해안 비말대에 폭로양생한 공시체의 경우보다 작은 것으로 나타났는데, 이것은 압축강도의 특성과 마찬가지로 전자가 후자보다 일정한 온도하에서 수분이 충분히 공급되므로, 콘크리트의 수화반응에 유리하여 다소 좋은 품질의 콘크리트가 얻어지기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 표준편차 및 변동계수

표 1은 물-시멘트비 및 양생조건 각각에 따른 염소이온 확산계수의 표준편차 및 변동계수를 나타낸 것으로, 표준편차는 양생조건에 관계없이 물-시멘트비가 감소함에 따라 작아지며, 실내 표준양생 및 현장 폭로양생한 콘크리트의 표준편차의 범위는 각각 $(0.4\sim0.7) \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, $(1.0\sim3.5) \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 로, 전자가 후자보다 양호한 것으로 나타났다. 이것은 전자가 후자보다 양생조건이 유리하여 보다 좋은 품질의 콘크리트가 얻어지기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 표준양생 및 폭로양생한 콘크리트의 변동계수는 각각 5.0~8.1%, 11.0~20.6%로, 전자가 후자보다 양호한 것으로 나타나, 양생조건이 유리할수록 변동계수는 작아지는 것으로 나타났다.

표 1. 염소이온 확산계수의 표준편차 및 변동계수

일련번호	염소이온 확산계수($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)					
	W/C=50%		W/C=42%		W/C=31%	
	표준양생	현장양생	표준양생	현장양생	표준양생	현장양생
1	12.4	132	8.2	8.2	4.4	5.2
2	12.8	136	8.2	8.4	4.5	5.3
3	12.8	139	8.4	8.4	4.5	5.3
4	13.0	139	8.5	8.6	4.6	5.4
5	13.2	142	8.9	8.9	5.0	5.4
6	13.5	144	9.0	8.9	5.0	5.7
7	13.5	144	9.1	9.0	5.0	6.1
8	13.6	152	9.1	9.1	5.1	6.2
9	13.6	15.4	9.2	9.3	5.1	6.2
10	13.7	15.8	9.2	9.5	5.1	6.3
11	13.7	16.2	9.3	9.8	5.2	6.3
12	13.9	16.2	9.5	9.8	5.2	6.4
13	13.9	16.7	9.5	10.0	5.2	6.4
14	13.9	17.9	9.6	10.3	5.3	6.6
15	13.9	17.9	9.6	10.3	5.3	6.6
16	14.2	19.7	9.8	10.4	5.4	7.2
17	14.4	20.5	9.8	10.9	5.4	7.6
18	14.5	21.0	9.9	11.0	5.4	7.7
19	15.0	22.3	10.6	11.3	6.0	8.4
20	15.1	27.2	10.8	12.3	6.0	8.5
합 계	274.6	339.6	186.2	194.4	102.7	128.8
평균	13.7	17.0	9.3	9.7	5.1	6.4
표준편차	0.7	3.5	0.7	1.1	0.4	1.0
변동계수(%)	5.0	20.6	7.3	11.0	8.1	15.0

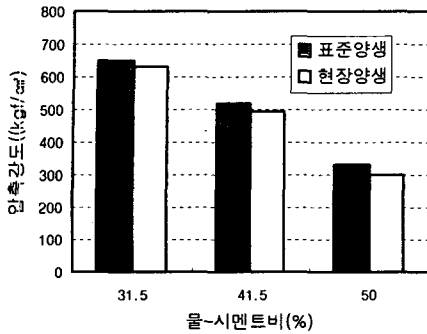


그림 1. 콘크리트의 압축강도

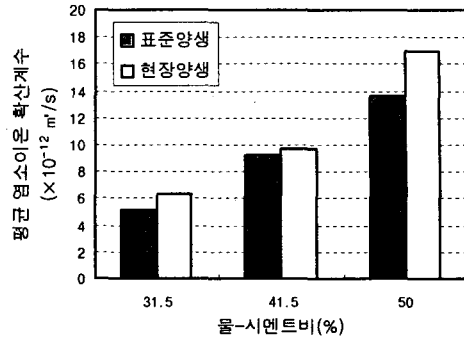


그림 2. 콘크리트의 평균 염소이온 확산계수

4. 결론

- 1) 콘크리트의 물-시멘트비가 감소함에 따라 평균 염소이온 확산계수는 크게 작아지는 것으로 나타났다는데, 이는 물-시멘트비가 작을수록 내부 공극이 적어서 염소이온의 침투·확산이 어려워지기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 동일 물-시멘트비의 경우, 표준양생한 공시체의 평균 염소이온 확산계수가 동해안 비말대에 폭로양생한 공시체의 경우보다 작은 것으로 나타났는데, 이것은 전자가 후자보다 일정한 온도하에서 수분이 충분히 공급되므로, 콘크리트의 수화반응에 유리하여 다소 좋은 품질의 콘크리트가 얻어지기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) 표준편차는 양생조건에 관계없이 물-시멘트비가 감소함에 따라 작아지며, 실내 표준양생 및 현장 폭로양생한 콘크리트의 표준편차의 범위는 각각 $(0.4\sim0.7) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $(1.0\sim3.5) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로, 전자가 후자보다 양호한 것으로 나타났는데, 이것은 전자가 후자보다 양생조건이 유리하여 보다 좋은 품질의 콘크리트가 얻어지기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 표준양생 및 폭로양생한 콘크리트의 변동계수는 각각 5.0~8.1%, 11.0~20.6%로, 전자가 후자보다 양호한 것으로 나타나, 양생조건이 유리할수록 변동계수는 작아지는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구결과는 물-시멘트비(50%, 41.5%, 31.5%) 및 양생조건(표준 및 현장양생) 각각에 따라 재령 28일에 대해서 분석한 것으로, 측정자료가 미비한 실정이다. 금후 보다 신뢰적인 염소이온 확산계수의 통계적 성질을 얻기 위하여 측정재령을 장기화하여 지속적으로 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부의 지원사업인 교량설계핵심기술연구단의 ‘콘크리트 교량의 내구성 설계기술 개발’ 과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. DuraCrete Final Report, "DuraCrete Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures", 2000
2. L. Tang and L. O. Nilsson, "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field"; ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 1, 1992, pp. 49~53.