

콘크리트의 배합특성이 염화물 확산계수에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Concrete Mixing Properties on Chloride Diffusion Coefficients

○ 김도겸* 박승범** 조광연* 이종석*** 김성욱****
Kim, Do Gyeum Park, Seung Bum Joh, Kwang Youn Lee, Jong Suk Kim, Sung Wook

ABSTRACT

Chloride ions are considered to be the major cause of steel corrosion in concrete structures exposed to seashore environments. Thus, estimating chloride ion concentrations by ages is needed to predict service life of seashore structures.

Experimentally measured chloride profiles were used in this study for estimating chloride diffusion coefficients, and a relationship between mixing properties and chloride diffusion coefficients is proposed for predicting chloride penetrations.

1. 서론

열화요인의 침투 메카니즘과 그 비율은 구조물의 사용 환경, 콘크리트의 내구성 및 기하학적 미세 구조에 의존하므로 이들 요인을 정량적으로 분석할 수 있다면 구조물의 장기적인 열화 정도를 예측할 수 있으며 콘크리트의 미세 구조는 시멘트, 물, 골재, 혼화제 등의 콘크리트 배합 구성 물질과 이들의 배합 비율, 제조 방법 및 양생 조건 등에 의해 영향을 받는다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 내구성 및 기하학적 구조를 나타내는 지표로서 압축 강도, 공극율, 투기성을 선정하고 콘크리트의 배합 특성에 따른 이들 내구성 지표의 변화를 분석하므로써 콘크리트의 내구성 및 미세 구조의 변화에 미치는 배합 특성의 영향을 검토하였으며, 배합 특성에 따른 염화물 확산 속도 및 내구성 지표의 변화에 따른 염화물 확산 속도를 검토하였다.

2. 공시체 제작 및 시험 방법

2.1 공시체 제작

보통 강도 콘크리트와 고강도 콘크리트는 사용 재료의 배합비 뿐만이 아니라 적용 대상 구조물도

* 정희원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 한국건설기술연구원 구조재료연구그룹 연구원

**** 정희원, 한국건설기술연구원 구조재료연구그룹 선임연구원

상이하므로 본 연구에서는 설계 강도 210~350kg/cm²의 콘크리트를 보통 강도 콘크리트로 하고 350~500kg/cm²의 콘크리트를 고강도 콘크리트로 하여 각각 N-계열 및 H-계열로 분류한 후 배합 설계 및 실험을 실시하였다. 총 23종류의 배합에 대하여 원주형 공시체(Φ100×200mm)와 정육면체 공시체(200×200×200mm)를 제작하였으며, 정육면체 공시체는 5개면을 예폭시 도장으로 처리하여 염화물의 일방향 침투를 유도하였다. 또한, 염화물 이온에 의한 확산만을 고려하기 위하여 NaCl 95% 농도의 화학약품을 사용하여 3.6%의 용액을 제조한 후 침적 실험을 실시하였다.

2.2 실험 방법

압축강도는 KS F 2405에 준하여 측정하였다. 실험공극율은 ASTM C 642에 의해 측정하였으며 Neville이 제시한 방법에 의하여 이론적 공극율을 계산하였다. 콘크리트의 투기성 측정은 5개면을 예폭시로 실링(sealing)한 공시체에 대하여 독일 P사 제품의 Permeability Tester를 사용하여 측정하였다. 가용성 염화물 함유량은 일본 콘크리트 공학 협회 기준(안)에 의해 염화물을 추출한 다음 이온 전극법을 이용한 일본 K사 제품의 AG-100을 사용하여 측정하였으며, 선택성 이온 전극과의 비교를 위하여 ASTM C 1218에 의하여 전량 적정법에 따른 수용성 염화물량을 측정하였다. 또한 총 염화물 함유량(산에 녹는 염화물 함유량)은 미국 J사 제품의 CL-1000을 사용하여 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 압축 강도

그림 1에서 보는 바와 같이 양생 조건별 NW 및 HW 계열의 강도 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데 이는 尾野幹也 등의 연구 결과와 유사한 것으로 28일간의 표준 양생을 실시한 콘크리트에서는 염화물 이온에 의한 압축 강도의 저하가 미미함을 나타내는 것이다.

3.2 콘크리트 공극율

그림 2에서 보는 바와 같이 실험 공극율(V_{EP})과 이론 공극율(V_{TP})은 직선적인 관계를 가지고 있으며, 회기 분석식은 $V_{EP}=0.8494 \cdot V_{TP}$ ($R^2=0.7506$)로 실험 공극율이 이론 공극율의 85%수준으로 나타났다.

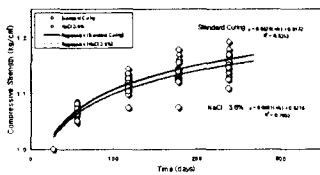


그림 1 강도변화

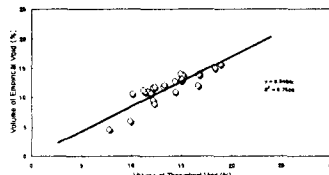


그림 2 이론과 실험 공극율

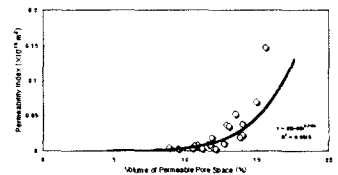


그림 3 공극율과 투기성

3.3 콘크리트의 투기성

보통강도 콘크리트에 있어서 w/c비의 변화에 따른 투기성의 변화는 w/c비가 증가함에 따라 투기성이 급격하게 증가하는 양상을 보이고 있는데, 이는 Powers 및 Lawrence 등의 연구결과와 일치하는 것으로 이들은 투기성과 w/c비와의 관계가 $Y=a \cdot X^n$ 의 관계에 있다고 하였으며, 본 실험에서는 회기

분석결과 $\alpha=1.6392$ $n=7.4648$ 로 분석되었다. 반면에 고강도 콘크리트에서는 큰 변화를 보이지 않고 있는데 이것은 Torrent가 제안한 진공 압력법에 의한 투기성 측정방법이 고강도 콘크리트에 대하여는 분별력이 적음을 나타내는 것으로 사료된다. 또한 공극률과 투기성과의 관계(그림 3)에서는 공극율 13% 부근부터 공극율이 증가함에 따라 투기성이 큰 폭으로 증가하고 있는데, 이러한 현상은 Ollivier와 Massat의 연구결과와 일치하는 것으로 투기성이 공극율의 n승배에 비례하기 때문으로 판단된다. 본 실험에서는 투기성과 공극율의 관계가 $Y=2 \times 10^{-9} \cdot X^{6.2464}$ 로 분석되었다.

3.4 가용성 염화물 함유량과 총 염화물 함유량

가용성 염화물 이온량과 총 염화물 이온량은 비례적인 관계로서 총염화물 이온량의 약 53.4%가 가용성 염분량인 것으로 분석되었는데 이 결과는 Arya와 Newmann의 연구 결과와 일치하는 것이다. 한편 Dhir은 총염화물 이온량 0.5%이하에서는 약 65%가 가용성 염화물 이온량이며, 총염화물량이 3%일 경우에는 84%까지 가용성 염화물량이 증가하는 것으로 보고하고 있다.

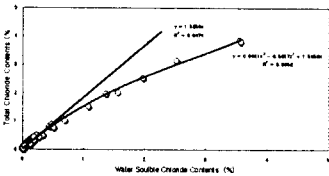


그림 4 총염화물량과 자유염화물량

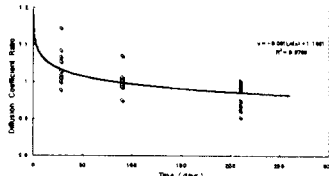


그림 5 재령별 변화

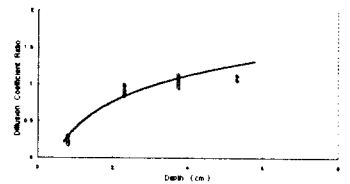


그림 6 깊이별 변화

3.5 염화물 함유량 및 염화물 확산 계수

그림 5에서 보는 바와 같이 염화물 확산 계수는 재령별로 변화하지만 재령이 증가함에 따라 변화 정도는 현저히 감소하는 것으로 판단되는데, 이러한 경향은 Anna와 Roberto 등의 연구와 일치하는 것으로 콘크리트 수화도 및 압축 강도의 증진 경향과 상관 관계가 있는 것으로 생각된다. 또한 깊이에 따른 확산 계수의 변화는 그림 6에서 보는 바와 같이 표면부에서의 염화물 확산 계수가 매우 낮게 평가되고 깊이가 커질수록 다소 증가함을 나타내고 있는데 이러한 경향은 Wood, 小林 및 김의 연구와도 일치하는 것이다.

4. 실험결과 고찰

4.1 배합특성과 염화물 확산계수와와의 관계

Press 및 Flannery 등이 제안한 Levenberg-Marquardt algorithm으로부터 w/c비의 증가에 따른 염화물 확산계수의 변화를 지수 함수(exponential function)로 추정하여 회귀 분석을 실시한 결과는 다음과 같다. $C = A \cdot e^{B/x} \rightarrow D_e = 18.934e^{-1.5c/w} (\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s})$

그림 8에서 보는 바와 같이 잔골재율과 염화물 확산계수의 관계는 잔골재율(S/a) 0.4~0.45의 범위에서 다소 낮은 값을 나타내었지만 그 경향은 매우 미미한 것으로 분석되었다. 한편, 단위시멘트량과의 관계는 그림 9에서 보는 바와 같이 NC-계열 및 HC-계열 모두 단위 시멘트량의 증가에 따라 염화물 확산계수가 증가하고 있는 양상을 보이고 있는데 증가 정도는 100kg/m^3 에 대하여 $0.5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 분석되었다. 이러한 결과는 단위 시멘트량의 증가함에 따라 시멘트 페이스트의 절대용적이 증가하기

때문으로 판단된다. Equivalent medium theory에 기초한 Kozeny-Carman 방정식으로부터 이론공극율과 확산계수와의 관계를 분석한 결과 $D_e = 0.001 \cdot V_{TP}^{2.5691}$ 로 분석되었다. 배합특성에 따른 염화물 확산계수에 대한 다중회기분석식은 $D_e = 2.277 \cdot e^{-1.6c/w} \cdot W_c \cdot V_{TP}^{-0.72}$ 로 분석되었다.

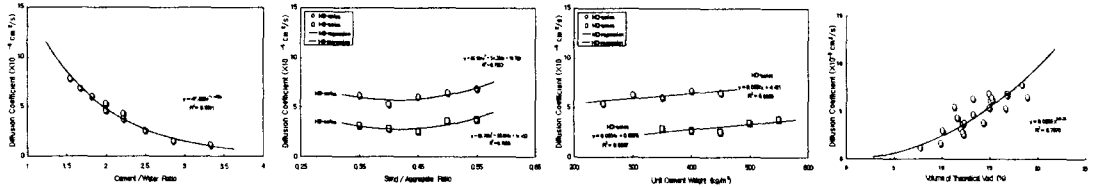


그림 7 w/c비와 확산계수 그림 8 잔골재율과 확산계수 그림 9 단위시멘트량과 확산계수 그림 10 이론공극율과 확산계수

4.2 물리적 특성과 염화물 확산계수와의 관계

콘크리트의 압축강도와 염화물 확산계수와의 관계는 압축강도가 증가함에 따라 염화물 확산계수가지수의 비율로 감소하는 경향을 보이고 있다. Powers가 정의한 수화된 시멘트 페이스트의 압축강도와 공극과의 관계로부터 염화물 확산계수를 공극의 항으로 표현하면 염화물 확산계수는 시멘트 페이스트 내부의 공극이 증가할수록 지수관계로 증가하는 관계로 나타낼 수 있다.

$$f_{cp} = f_{cp0}(1 - V_{cp})^n \Rightarrow D_e = A \cdot f_c^{-m/n} \Rightarrow D_e = 2.067 \times 10^5 \cdot f_c^{-2.1044}$$

그림 12에서 보는바와 같이 실험 공극율과 염화물 확산 계수와의 관계는 Kozeny-Carman 방정식과 같이 지수의 비율로 증가함을 나타낸다. 한편, Hagen-Poiseuille의 법칙이 작은 공극에서 유효하다는 가정하에서 확산계수를 매질(媒質)의 단면에 포함되어있는 반경의 단순 공극에 대한 투기성 K로 정리하면 $K = constant \times D^b$ 가 되는데 이는 Katz-Thompson 방정식이라 불리우며, Gaber가 유도한 식과 동일하게 된다. 이것을 투기성의 항으로 정리하면 $D_e = \beta \cdot K^{1/b} \Rightarrow D_e = 4.8523 \cdot K^{0.3862}$ 이 된다. 물리적 특성과 확산계수와의 관계는 $D_e = 1.4 \cdot f_c^{-0.662} \cdot V_{EP}^{1.526} \cdot K^{0.072}$ 로 표현할 수 있다.

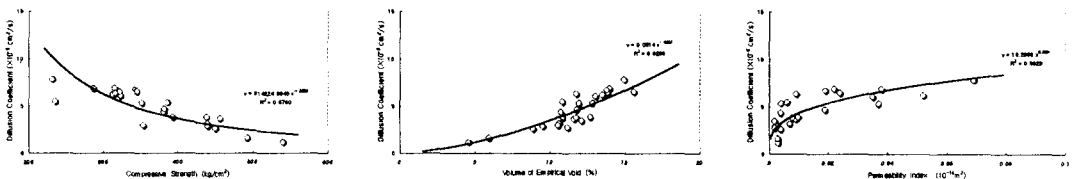


그림 11 압축강도와 확산계수 그림 12 실험공극율과 확산계수 그림 13 투기성과 확산계수

5. 결론

본 연구에서는 각각의 이론에 근거하여 배합 특성에 따른 염화물 확산 속도 및 내구성 지표의 변화에 따른 염화물 확산 속도를 분석하였으며, 다중회기분석을 통하여 신규 및 기존 구조물의 염해 열화 속도를 평가할 수 있는 모델식을 제안하였다. 본 연구에서 도출한 모델식은 철근의 부식으로 인한 구조물의 사용수명 평가 및 철근의 부식시기예측에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.