

탄산화된 콘크리트의 투수계수에 대한 시간단계별 해석

Time Evolution of Water Permeability Coefficient of Carbonated Concrete

윤인석* 이정윤** 조병영*** 김영근****
Yoon In-Seok Lee Jeong-Yun Cho Byung-Young Kim Young-Geun

Abstract

Permeability coefficient of concrete is a substantial key parameter for understanding the durability performance of concrete and its micro-structural densification. Many researches to deal with the issue have been accomplished, however, it is very rare to deal with the theoretical study on permeability coefficient in connection with carbonation of concrete and the effect of volumetric fraction of cement paste or aggregate on the permeability coefficient. The majority of these researches have not dealt with this issue combined with carbonation of concrete, although carbonation can significantly impact on the permeability coefficient of concrete.

The purpose of this study is to establish a fundamental approach to compute the permeability coefficient of (non)carbonated concrete. When simulating micro-structural characteristics as a starting point for deriving a model for the permeability coefficient by the numerical simulation program for cementitious materials, HYMOSTRUC, a more realistic formulation can be achieved. For several compositions of cement pastes, the permeability coefficient is calculated with the analytical formulation, followed by a microstructure-based model. Emphasis is on the micro-structural changes and its effective change of the permeability coefficient of carbonated concrete. The results of micro-structural water permeability coefficient model will be compared with results achieved from permeability experiments.

요약

콘크리트의 투수계수는 콘크리트 구조물의 내구성능 및 미세구조의 밀실성을 판단하는 핵심적인 재료 매개변수이다. 투수계수를 산정하기 위한 많은 연구들이 있었으나, 시멘트 페이스트 및 골재 각각이 콘크리트의 투수성능에 미치는 영향을 다룬 연구는 드물다. 더우기, 탄산화가 염소이온의 확산계수에 큰 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 탄산화된 콘크리트에 대한 확산계수를 다룬 연구는 더욱 드문 실정이다.

본 연구의 목적은 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 투수계수를 추정할 수 있는 기초적 접근방법을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 미세구조 모델 및 시멘트의 경화특성을 기초로 투수계수를 산정할 수 있는 해석적 기법이 개발되었다. 본 연구에서는 시간단계별로 변화하는 투수계수의 해석과 중성화된 콘크리트의 투수계수이다. 탄산화된 콘크리트에서 감소된 공극량이 계산되었으며 이는 투수계수의 산정에 이용되었다. 본 연구결과는 실험적 결과를 얻어서 상호 비교하여 검증하였다.

* 정회원, 인덕대학 건설정보과 전임강사

** 정회원, 한국건자재시험연구원 방수보수보강센터 연구원

*** 정회원, 한국건자재시험연구원 방수보수보강센터 선임연구원

**** 정회원, 한국건자재시험연구원 방수보수보강센터 센터장

1. 서 론

투수계수에 대한 기존의 연구들을 살펴보면, 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 공극구조 특성을 기초로 투수계수와 의 상관성을 구명하는 연구가 경험적 방법에서부터 공극구조 모델링을 통한 이미지 해석 방법까지 다양하게 진행되어 왔다. 그러나, 투수계수 산정에 대한 연구는 장기간 동안 시멘트 콘크리트의 미세구조 측면에서 연구되어 왔음에도 불구하고, 복잡한 콘크리트의 구성 재료별 특성은 물론 탄산화와 같은 영향효과를 고려한 연구는 매우 부족하다.

본 연구의 목적은 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 투수계수 산정을 위한 실용적 해석 기법을 개발하는 것이다. 투수계수는 시멘트의 수화반응으로 인한 시멘트 페이스트의 공극 구조 특성, 골재의 존재효과 등이 고려되었다. 본 연구의 접근방법으로 멀티스케일 모델링 기법을 정립하고, 다양한 콘크리트 성능평가 시스템의 개발에 유용할 것으로 생각된다.

2. 콘크리트 투수계수의 재료 모델링

(1) 시멘트 경화체의 공극구조 : Maekawa[1]는 시멘트 경화체의 공극분포 특성을 식 (1)과 같이 제안하였으며 이로부터 시멘트 경화체의 총 공극량(ϕ)은 식 (2)와 같다. 여기서, V_p : 공극반경 r 을 변수로 한 공극구조, B : 공극분포 함수의 매개변수이다. 공극량 ϕ 를 이미 알고 있다면, 공극분포 함수의 매개변수 B 는 역산하는 방법으로 계산되며, 공극량 ϕ 는 시멘트계 재료의 수화단계별 시뮬레이션 프로그램인 HYMOSTRUC[3]을 이용하여 구하였다.

$$dV_p = Br \exp(-Br) d \ln r \quad (1) \quad \phi = \int_0^{\infty} Br \exp(-Br) d \ln r \quad (2)$$

(2) 공극에 의한 굴곡특성 : 다공질성 재료의 굴곡 특성계수(τ_T , Tortuosity)는 유체의 침투 경로에 대한 최단거리 (λ)와 유효거리(λ_e)의 비율을 의미한다. 저자의 기존 연구[2]에서, 단위체적 당 존재하는 시멘트 수화물을 하나의 셀로 간주하고, 시멘트 코어를 정사각형으로 가정한 후, 원형과 정사각형의 형상함수를 고려함으로써 계산한 바 있다. 본 연구에서는 투수에 의한 수분유입의 굴곡특성에 이 방법을 이용하였다.

(4) 시멘트 경화체의 공극수분량 : 외부와 차단된 상태에서 시멘트계 재료의 공극구조는 공기가 차지하는 체적량 ϕ_{vapour} 와 배합수에 의한 내부 포화도 S_i 에 의하여 모세공극 내 수분량 $\phi_{w(cap)}$ 으로 구성된다. 포화상태에 따른 콘크리트의 공극분포 특성을 수식으로 표현하면 식 (3) 및 (4)와 같으며[3], 여기서 α : 시멘트의 수화도, ρ_{ce} : 시멘트의 단위중량, ρ_w : 배합수의 단위중량, w/c : 물-시멘트비이다.

$$S_i (= \frac{\phi_{w(cap)}}{\phi_{pore}}) \leq S \leq 1 (= \frac{\phi_w (= \phi_{pore})}{\phi_{pore}}) \quad (3) \quad \phi_{w(cap)} (\alpha) = \frac{\rho_{ce}}{\rho_w + \rho_{ce} \cdot w/c} (w/c - 0.4 \alpha) \cdot V_{cp} \quad (4)$$

(5) 시멘트 경화체의 투수계수 : 다공질성 재료의 투수계수 산정에 가장 보편적으로 이용되고 있는 Darcy 의 법칙에 의하여 유체의 흐름에 대한 굴곡 특성계수를 고려하면 다공질성 재료의 투수계수는 식 (5)와 같다. 액체 및 기체의 투수(기)성은 시멘트의 수화과정에서 공극이 수분에 의해 채워졌는지의 유무에 의존하며 모세관 공극내 존재하는 수분은 공극내 가장 작은 공극 d_o 와 수분에 의해 채워진 공극 d_{wat} 사이에 존재한다고 가정할 수 있다. 외부의 수분이 차단된 조건에서 액체의 동점성 μ 와 동점성률 ν 간의 관계로부터 식 (6)과 같이 시멘트 페이스트의 투수계수를 표현할 수 있다.

$$K = \frac{\kappa r_w}{\mu \tau_T} \quad (5) \quad K_{cp}^{dry} = \frac{\kappa r_w}{\mu \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{wat}^2) r_w}{64 \mu \tau_T} = \frac{(d_o^2 + d_{wat}^2) g}{64 \nu \tau_T} \quad (6)$$

(6) 콘크리트의 투수계수 : 콘크리트의 투수계수는 시멘트의 투수계수보다 더욱 가변적인 특성이 강하다. 복합재료로 구성되어 있는 콘크리트의 구성 특성을 단순화하기 위하여, 시멘트 페이스트와 골재, 각각의 재료가 콘크리트의 투수계수에 미치는 영향을 정량적으로 표현할 필요가 있다.

Fig. 1 은 Hooke 의 탄성법칙과 Darcy 법칙의 비교한 것으로 다음과 같은 상사성을 고려할 수 있다. 첫째, 두법칙의 구동력은 외력 및 압력에 기인한다. 둘째, 외력 혹은 압력의 재하시 Hooke 의 탄성법칙은 응력과 변형율이, Darcy 법칙은 압력과 압력구배가 선형 거동을 한다. 셋째, Hooke 의 탄성법칙에서 하중재하에 따른 재료특성을 반영하는 강성을 탄성계수 E 로, Darcy 의 법칙은 재료의 수전도성을 투수계수 K 로 표현하였다. 이상의 상사성을 정리한 것이 Table 1 이다.

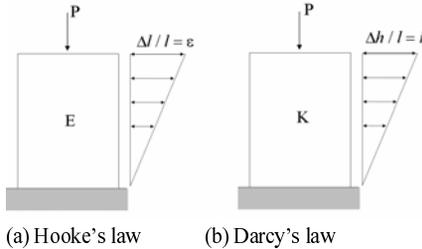


Fig. 1 Comparison of Hooke's law and Darcy's law

Table 1 Similarity of Hooke's law and Darcy's law

	Hooke's law	Darcy's law
Driving force	P	P
Impact to material	Stress, f	Water charge, Q
Response	Strain, ϵ	Pressure gradient, i
Material properties	Elastic modulus, E	Permeability Coeff, K

위의 두 법칙간의 상사성을 토대로 Hirsch 모델[4]에서 시멘트 페이스트와 골재, 2 가지 재료로 구성되어 있는 콘크리트 복합체의 재료적 성질을 고려하여 각 구성재료의 탄성계수를 투수계수로 치환하면 콘크리트의 투수계수 K_{con} 을 식 (6)과 같이 재현할 수 있다. 여기서, λ 와 ζ 는 콘크리트내의 골재량 V_{agg} 에 의해 결정할 수 있다.

$$K_{con}(\alpha) = \frac{K_{cp}(\alpha)[\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta)K_{agg}]}{K_{cp}(\alpha)\lambda + (1-\lambda)[\zeta \cdot K_{cp}(\alpha) + (1-\zeta)K_{agg}]} \quad (7) \quad \lambda = 1 - \zeta = \sqrt{V_{agg}} \quad (8)$$

(7) 탄산화된 콘크리트의 공극감소량 : 탄산화될 수 있는 수화물 CH 와 C-S-H 의 농도를 토대로 물체적비율을 고려하여 탄산화로 인한 감소된 공극량($\Delta\phi_c$)을 식 (9)에 의하여 구할 수 있다. 이때, 수화물의 생성농도는 Papadakis[5]가 제안한 각각의 수화 반응물량을 계산하여 구하였으며 여기서, $\Delta\bar{V}_{CH} = 3.85 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$, $\Delta\bar{V}_{CSH} = 15.39 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ 이다. 따라서, 탄산화된 콘크리트의 공극량은 식 (9)와 같다. 탄산화된 콘크리트의 공극량을 토대로 식 (1)의 멀티요소함수를 재차 이용하여 탄산화된 콘크리트의 염소이온 확산계수가 계산되었다. 여기서, ϕ_c : 탄산화된 콘크리트의 공극량, ϕ : 비탄산화된 콘크리트의 공극량이다.

$$\Delta\phi_c = ([Ca(OH)_2(s)]_0 - [Ca(OH)_2(s)])\Delta\bar{V}_{CH} + ([C-S-H]_0 - [C-S-H])\Delta\bar{V}_{CSH} \quad (9) \quad \phi_c = \phi - \Delta\phi_c \quad (10)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 2 는 본 연구에서 제안한 해석 방법에 의하여 물-시멘트비를 변수로 시간경과에 따른 시멘트 페이스트의 투수계수의 변화율을 계산한 결과이다. 시간의 경과에 따라 투수계수가 초기에는 매우 가파르게 감소하는 추세를 보이지만, 100 일 이상의 재령에서 그 변화율은 비교적 완만하지만 꾸준히 감소추세를 볼 수 있다.

Fig. 3 은 콘크리트의 투수계수를 산정한 결과이다. 초기재령에서 투수계수는 매우 낮은 결과를 보이고 있다. 초기단계에서 콘크리트의 투수계수는 물-시멘트비와 무관하게 일정한 추이를 보이지만, 재령이 경과함에 따라 물-시멘트비에 따른 차이는 뚜렷이 보이는 것으로 나타났다. 이는 경화된 단계에서 콘크리트의 투수계수는 시멘트 페이스트의 품질의 영향이 적으나, 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라 물-시멘트비에 따른 공극구조의 발현이 차이를 보이기 때문에 기인된 현상으로 생각된다.

Fig. 4 는 탄산화된 콘크리트의 투수계수에 대한 계산결과 및 실험결과를 보인 것이다. 앞서 비탄산화가 된 시멘트 콘크리트의 경우와 유사하게, 시멘트 페이스트의 투수계수가 콘크리트의 투수계수보다 작은 결과를 초래하였다. 향후, 탄산화된 콘크리트의 장기 투수계수의 산정을 더욱 정확히 추정하기 위하여 탄산화로 인한 공극 분포감소량을 예측할 수 있는 정확한 모델링 기법과 탄산화로 인하여 변한 시멘트 조직체의 화학적 특성이 염소이온 침투에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 5 는 검증 실험프로그램이며, Figs. 6-7 은 본 연구의 방법에 의하여 계산된 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 투수계수를 시간의 경과에 따라 얻은 결과를 비교한 것이다. 감소추세의 비율은 대체로 일치하는

경향이 있으나, 실험결과치가 본 연구의 해석결과보다 높은 추이를 보였다. 일반적으로, 물-시멘트비 0.45 인 콘크리트는 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ m/s, 물-시멘트비 0.50 인 콘크리트는 10^{-12} m/s 규모의 투수계수를 갖는 것으로 알려졌는데, 본 연구의 해석결과는 이 범주를 만족하는 것으로 나타났다. 향후, 시멘트 페이스트와 골재의 경계영역에 존재하는 ITZ 효과를 반영하여 더욱 정밀한 투수계수의 산출기법이 연구될 예정이다.

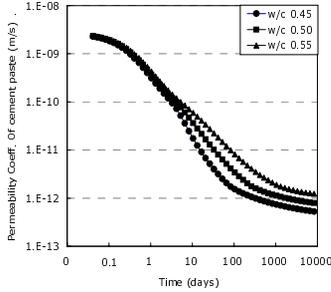


Fig. 2 Permeability coefficient of cement paste

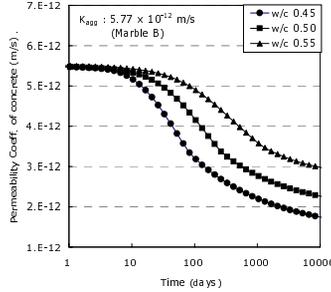


Fig. 3 Permeability coefficient of concrete

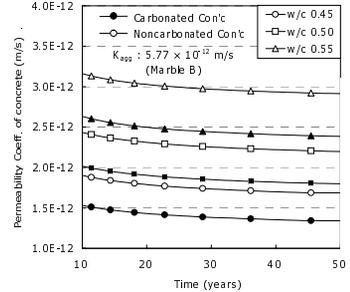


Fig. 4 Permeability coefficient of carbonated concrete

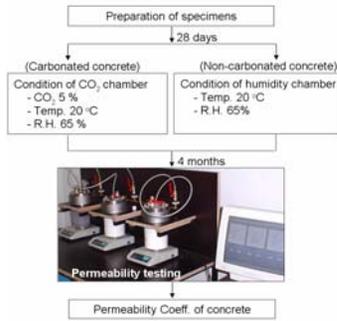


Fig. 5 Experimental programs

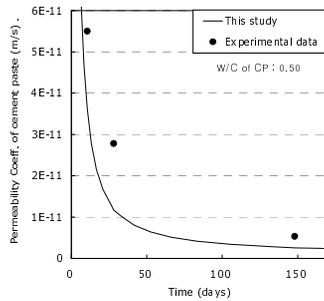


Fig. 6 Comparison of experiment and this study for concrete

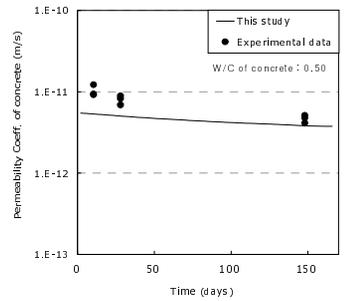


Fig. 7 Comparison of experiment and this study for carbonated concrete

4. 결 론

본 연구에서는 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 투수계수를 재료 모델링 하였다. 본 연구를 기초로 향후 나노단위의 시멘트 수화물부터 메소단위의 콘크리트 재료적 특성이 고려된 멀티스케일 측면에서 시멘트의 과학 및 콘크리트의 공학적 지식이 통합된 콘크리트의 내구성 설계 시스템의 개발에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) K. Maekawa, R. Chaube, and T. Kishi, "Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport," E & FN Spon, 1999.
- 2) 윤인석, 김은겸, 이창수, "탄산화를 고려한 콘크리트의 염소이온 확산계수 해석기법," 대한토목학회 논문집, 제27권, 4A호, pp.617-625, 2007. 7.
- 3) K. van Breugel, "Simulation of Hydration and Formation of Structures in Hardening Cement-Based Materials," Ph. D Dissertation, TU Delft, The Netherlands, 1991.
- 4) T. J. Hirsch, "Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Modulus of Cement Paste Matrix and Aggregate," Journal of the American Concrete Institute, No.59-12, pp.427-451, 1962.
- 5) V. G. Papadakis, C. G. Vayenas, "Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation," *ChE Journal*, Vol.35, No.10, pp.1639-1650, 1989.