

재령 및 균열효과를 고려한 플라이애시 콘크리트의 정상상태 염화물 확산 특성의 정량화

Quantification of Chloride Diffusivity in Steady State Condition in Concrete with Fly Ash Considering Curing and Crack Effect

윤용식¹ · 천주현² · 권성준^{3*}

Yong-Sik Yoon¹ · Ju-Hyun Cheon² · Seung-Jun Kwon^{3*}

(Received March 18, 2019 / Revised April 10, 2019 / Accepted April 10, 2019)

In case of the cracks in concrete, the penetration of deterioration ions such as chloride ions in to cracks is accelerated. According to the penetration of chloride ions, structural and durability problems to RC(Reinforced Concrete) structures are caused. In this study, the accelerated chloride diffusion coefficient which is in steady state is evaluated for 2 year aged normal and high strength FA(Fly Ash) concrete, after a range of crack depths are induced up to 1.0 mm in 56 aged day. Considering crack effect by linear regression analysis, high strength concrete has slightly less increasing ratio of diffusion coefficient by crack than normal strength concrete, and diffusion coefficient increases non-linearly as crack width is increased. Also, In two types of concrete, crack effect decrease as the curing period increase. In the case of quantifying crack and curing effect by using exponential function form, the coefficients of determination are higher than those of linear regression analysis. Under steady state, it is thought that there is not a high correlation between the crack effect and the curing effect, and considering the two independent effects, it is believed that reasonable prediction equation for diffusion of concrete with crack can be proposed.

키워드 : 플라이애시, 염화물 확산계수, 균열, 시간의존성

Keywords : Fly ash, Chloride diffusion coefficient, Crack, Time-dependent

1. 서론

콘크리트는 경제적이며 내구성이 확보된 건설재료이지만, 인장 강도가 낮으므로 균열이 발생하기 쉽다(Neville 1995; Maekawa et al. 2009). 최근 들어 구조물이 대형화되고 단위 결합재량이 많은 고성능 콘크리트를 사용하게 됨에 따라 온도 및 양생제어가 적절하게 수행되지 않을 경우 수화열 및 건조수축 등 재료거동에 기반한 균열이 쉽게 발생한다(Song et al. 2001; JSCE 2007).

콘크리트 내부에 매립된 철근은 일반적으로 pH 12.5 이상의 높은 알칼리 조건에 있으므로 부식으로부터 안전하다고 알려져 있으나, 높은 활동성을 가진 할로겐 이온, 특히 염화물 이온에 노출된

경우 Pitting 형태의 부식이 발생하게 되고 이로 인해 부식기구가 발생한다. 토목 구조물의 경우 하나의 철근에서 발생하는 micro corrosion 기구와 둘 이상의 철근에서 발생하는 macro corrosion 기구로 분류할 수 있는데, 두 가지 모두 염화물 이온의 활성화에 따라 크게 영향을 받는다(Broomfield 1997; Zhou et al. 2009). 부식이 발생할 경우, 초기에 부식의 진전에 따라 발생된 녹(Rust)은 콘크리트와의 부착력을 증가시키는데, 보통 4% 이상의 부식이 발생할 경우 급작스런 슬립이 발생하여 구조체로서의 역할을 기대할 수 없다(Chung et al. 2008).

초기에 발생한 부식은 콘크리트 밖으로 투영되어 미관을 손상시키며 균열의 발생, 피복 콘크리트의 박락 등의 문제로 진전되고

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹한남대학교 건설시스템공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

²한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 주임 연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)

³한남대학교 건설시스템공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

최종적으로 내력저하에 따른 안전성 문제로 진전된다. 많은 연구에서 부식에 따른 내력저하를 다루고 있으나, 실내 실험에서 정해진 배합 및 부식조건에 따른 결과를 기본으로 하고 있으므로 다양한 조건에 대한 연성거동을 다루고 있지 못한 실정이다. 균열을 가진 콘크리트에서의 염화물 침투 및 확산은 매우 촉진되며 부식 개시 및 진전속도는 크게 증가한다. 해수 중 콘크리트의 경우 부식 속도는 낮지만, 비말대나 조석대의 균열부 콘크리트에서는 확산 및 부식이 빠르게 증가하므로 이에 대한 제어 및 평가는 구조물의 유지관리에 필수적이라 할 수 있다.

많은 연구에서 균열부의 염화물 거동을 다루고 있는데, 대표체적(REV: Representative Element Volume)을 이용하여 전체 이온 흐름(Flux)을 평균화한 해석이 일반적이다(Park et al. 2012a; Park et al. 2012b; Gerard and Marchand 2000). 이러한 기법은 정상상태를 가정하므로 확산 초기의 균열 폭 내부로 큰 유입은 고려되지 못한다. 또한 비정상상태를 이용한 확산 연구에서는 짧은 시간동안 0.4mm 수준의 균열 폭을 가질 경우 100배 이상의 높은 확산계수의 증가가 발생하므로 내구수명 평가 등 내구성 해석에 직접적으로 사용하기가 어렵다(Park et al. 2012a). 또한 최근에는 EPMA(Electron Probe Micro Analysis) 장비 등을 이용하여 균열깊이 및 균열 폭에 대하여 염화물 침투량을 정량적으로 평가하려는 시도도 꾸준히 진행되고 있다(Win et al. 2004; Park et al. 2001). 재령 초기에 발생한 콘크리트의 균열 폭은 일반적으로 수분 및 염화물 이온의 침투에 따른 재수화로 인해 감소하게 된다. 또한 시간에 따라 공극률의 감소, 수화물의 지속적인 성장에 따른 염화물 흡착으로 인해 염화물 확산계수는 감소하게 된다(Jung et al. 2017; JSCE 2002).

1950년대부터 사용되어 온 플라이애시(FA: Fly Ash)는 주로 화력발전소에서 수집되는 산업부산물로서 수화열 저감, 작업성 개선, 공극구조 개선 등 많은 공학적인 장점을 가지고 있다. FA의 장점은 우수한 반응 포졸란 반응을 가지고 있다는 점인데, 같은 포졸란계 혼화재료 왕겨재(RHA: Rice Husk Ash)나 실리카 푼(SF: Silica Fume)보다 일반적으로 사용된다. 포졸란 반응은 시멘트계 물질에서 용출된 SiO₂나 Al₂O₃와 같은 가용성분이 수산화칼슘과 반응하여 불용성 칼슘 실리케이트 수화물(CSH)이나 칼슘알루미네이트 수화물(CAH gel)을 형성하는 것이다(Kim et al. 2009; Nath and Sarker 2011). 염해 관점에서 이러한 포졸란계 물성은 염화물을 흡착하는 성능은 OPC에 비해 일부 감소하지만, 장기적으로는 공극구조 크게 개선하고 강도가 증가하므로 내구성을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 FA 콘크리트를 대상으로 재령 56일에 다양한 균열 폭을 유도하였으며, 2년간 수중양생을 수행하였다. 이후 정상상태의 염화물 확산계수를 평가하였으며, 기존의 동일 배합으로

수행된 연구결과를 참고하여 확산계수의 시간의존성을 평가하였다. 본 연구에서는 보통 강도 및 고강도 FA 배합특성과 균열을 가진 콘크리트의 확산특성이 심도 있게 다루어진다.

2. 정상상태에서의 균열부 확산계수 평가

2.1 실험 개요

2년의 양생기간을 가진 보통 강도 및 고강도 FA 배합 콘크리트의 균열부 확산계수를 평가하기 위해 기존의 정상상태 촉진 염화물 확산 시험 방법을 사용하였으며(Andrade 1993), 재령 1년까지의 확산계수 및 강도 특성은 기존의 연구를 인용하였다(Jung et al. 2017). 보통 강도 및 고강도 FA 콘크리트를 제조한 뒤 24시간 뒤 탈형하였으며, 2년간 수중양생 후 압축강도를 평가하였다.

2.2 사용재료 및 배합

본 연구에서는 보통 강도 및 고강도 FA 콘크리트에 대하여 배합을 설정하였다. Table 1에서는 실험을 위한 배합표를 나타내고 있으며, Table 2에서는 사용된 시멘트 및 혼화재료의 화학적 성분을, Table 3에서는 사용된 골재 특성을 나타내고 있다.

Table 1. Mix proportions for FA based concrete

Type (psi)	W/B	S/a	Unit weight : kg/m ³				
			W	C	FA	G	S
High (6,000)	40.00	44.40	162.75	325.50	81.38	938.77	748.89
Normal (4,000)	50.00	46.70	162.75	260.64	64.86	938.77	822.01

W/B: Water to Binder, S/a : Sand to aggregate, W: Water, C: Cement, FA: Fly Ash, G: Gravel, S: Sand

Table 2. Physical and chemical properties of binder

	Physical properties		Chemical properties(%)						
	Specific gravity (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss
OPC	40.00	44.40	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79
FA	50.00	46.70	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3

Table 3. Physical properties of aggregates

Types	Items	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
	Sand	-	2.58	1.01	2.90
	Gravel	25	2.64	0.82	6.87

F.M.: Fineness Modulus

2.3 균열부 콘크리트의 정상상태 확산계수 평가

모든 시편은 수중 양생 56일에 높이 100mm의 디스크 시편으로 절단된 후, 프갠인장시험을 통하여 균열이 유도되었다. 콘크리트 표면에 균열 게이지를 부착하여 하중의 증가에 따른 균열 폭을 측정하였으며, 하중이 완전히 제하한 이후 감소된 균열 폭을 최종적인 균열 폭으로 산정하였다. 이후 균열을 가진 콘크리트에 대하여 추가 양생이 필요한 경우에는 추가로 수중 양생을 적용한 후 정상상태 촉진 염화물 확산실험을 수행하였다. NT BUILD 492와 같은 비정상 상태에서는 균열 폭으로 빠른 시간에 많은 염화물량이 유입되므로 정상상태를 기반으로 하는 Andrade 방법이 사용되었다(Andrade 1993). 비정상 상태에서는 균열 폭 내부로의 유입이 측정되므로 균열 폭이 0.1~0.4mm로 증가할 때, 최대 130~160배 정도의 증가가 관측되며, 정상상태의 경우는 대표체적 전체의 흐름이 고려되므로 균열부와 건전부의 체적비가 중요한 요인으로 작용한다고 알려져 있다(Park et al. 2012a; Park et al. 2012b). 균열을 가진 시편에 대하여 측면은 파라핀으로 밀봉하였으며, 양극부(anode)에는 0.1M NaOH 용액을, 음극부(cathode)에는 0.1M NaOH가 포함된 0.5M의 NaCl 용액을 채운 뒤, 30V의 전압을 유도하였다. 보통 48시간 이후 정상 상태에 도달하였으며, 측정된 전류와 식 (1)을 이용하여 촉진염화물 확산계수를 도출하였다(Andrade 1993).

$$D_{eff} = \frac{RT}{nF^2} \frac{it_d}{\Delta E} \frac{L}{A} \frac{1}{C_d Z} \quad (1)$$

여기서, R (8,314J/K·mol)은 기체상수, T (K)는 절대온도, Z 는 이온가, F (9,648×104J/V·mol)는 Faraday 상수, i (Ampere)는 시편 통과 전류, t_d 은 이동수, A (m²)는 시편의 단면적, ΔE (Volt)는 전압, L (m)은 시편의 두께, C_d 은 확산 셀에서의 염화물



Fig. 1. Loading for crack inducing and measuring

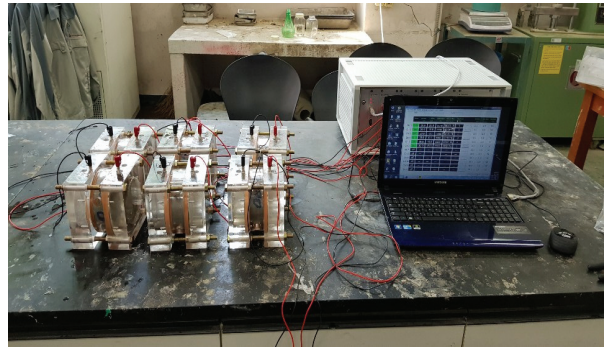


Fig. 2. Measurement of current during accelerated chloride diffusion test

이온 농도(mol/L)를 나타낸다.

Fig. 1에서는 균열 인가 사진을, Fig. 2에서는 촉진 염화물 확산 계수시험 전경을 나타내었다. 하중의 제하 방법 및 정상상태의 촉진 염화물 확산계수 측정 방법은 기존에 수행된 연구 방법과 동일하다(Jung et al. 2017; Cheon et al. 2017).

3. 2년 양생된 FA 콘크리트의 강도 특성 및 균열부를 고려한 시간의존성 확산계수 거동

3.1 재령에 따른 강도 특성

압축강도는 재령 56일, 180일, 365일, 730일의 재령에 수행되었는데, 2년 이전의 자료는 기존의 연구 결과에서 인용하였다(Jung et al. 2017). 두 가지 배합의 각 재령일에서 평가한 강도 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 재령 2년에서의 강도 증가는 56일에 비하여 보통 강도에서는 1.25배, 고강도에서는 1.11배 증가하였다. 장기재령에서의 강도 증가는 GGBFS와 더불어 FA를 사용한 콘크리트의 대표적인 장점이다(Kwon et al. 2014; Lee 2016).

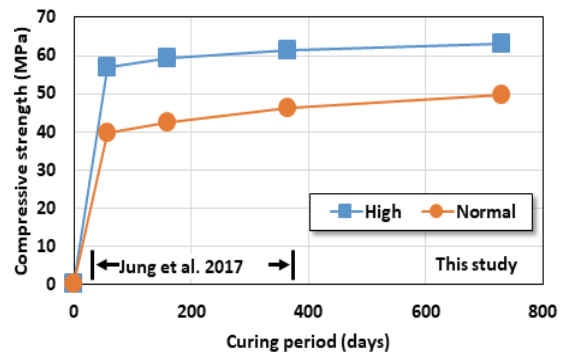


Fig. 3. Compressive strength in FA based concrete for 2 years

3.2 균열 폭에 따른 시간의존성 확산계수

재령 1년 이하의 재령에 대한 결과는 기존의 결과를 인용한 것이며(Jung et al. 2017), 재령 2년의 실험결과를 추가하여 Fig. 4 및 Fig. 5에 도시하였다.

재령 56일에서 보통 강도 시편의 확산계수는 균열 폭이 0.4mm 수준까지는 2.1~2.6배 정도로 증가하였으며, 균열 폭이 1.0mm 이상 증가할 경우 4배 이상으로 크게 증가하였다. 고강도 콘크리트에 대해서는 균열 폭이 증가함에 따라 비선형적인 패턴의 확산계수 증가가 나타났으며, 균열 폭 증가에 따른 확산계수 증가는 보통 강도에 비하여 약간 낮은 수준으로 평가되었다. 실제로 균열 폭이 증가할수록 확산성은 비선형적으로 증가한다. 재령에 따른 균열효과를 간단하게 비교하기 위하여 건전부를 기준으로 기울기를 선형적으로 회귀분석하면 Table 4와 같이 나타낼 수 있으며 이를 Fig. 6에 도시하였다.

단순한 균열효과를 선형적으로 비교하였을 때, 재령이 증가할수록 두 가지 배합 시편에서 모두 기울기가 감소하였다. 이는 재령이 증가함에 따라 균열부 확산성의 영향이 감소되기 때문인데, 이는 실질적인 균열 폭이 수화에 따라 감소되는 영향에 기인한다. 전체적인 확산계수 값은 고강도 콘크리트에서 매우 낮지만, 보통 강도 콘크리트의 균열 영향은 고강도 콘크리트 대비 재령의 증가에 따라 크게 감소한다. 이는 초기 재령인 56일에서 고강도 콘크리트의 확산

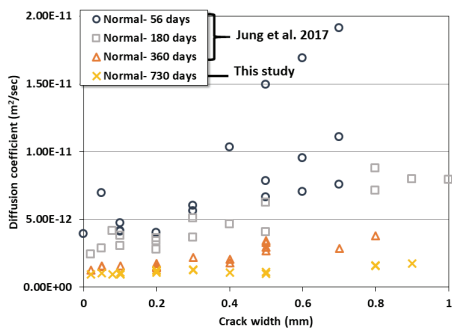


Fig. 4. Diffusion coefficient of normal strength with curing period

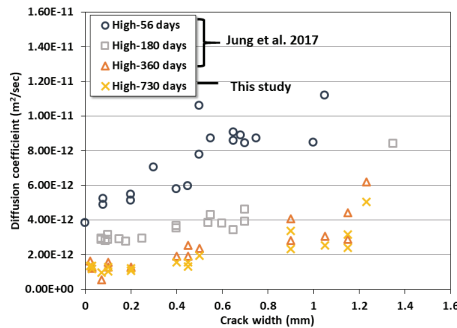


Fig. 5. Diffusion coefficient of high strength with curing period

Table 4. Linear analysis of diffusion coefficient considering crack and curing effect

Curing period	Normal strength		High strength	
	Gradient	R ²	Gradient	R ²
56	5.3755	0.5049	1.8230	0.7004
180	2.3809	0.8624	0.9188	0.6718
360	2.2591	0.7931	1.2565	0.6246
730	0.7297	0.6957	1.0038	0.7253

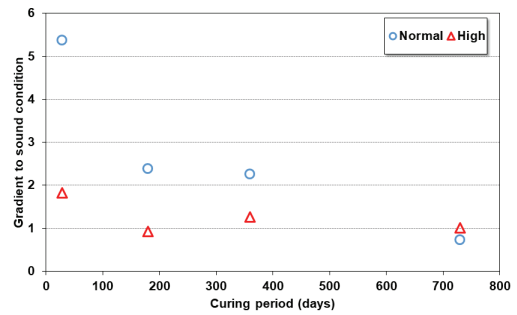


Fig. 6. Gradient to sound concrete for crack effect

계수 값이 매우 낮아서 상대적으로 보통 강도 콘크리트에 비해 감소율이 작기 때문이다.

4. 균열부 콘크리트의 시간의존성 변화

4.1 재령을 고려한 건전부 및 균열효과 정량화

본 연구에서는 균열 및 재령을 고려한 확산계수의 정량화를 위하여 Fig. 7과 같은 절차를 제안하여 실험 결과를 정리하였다. 균열

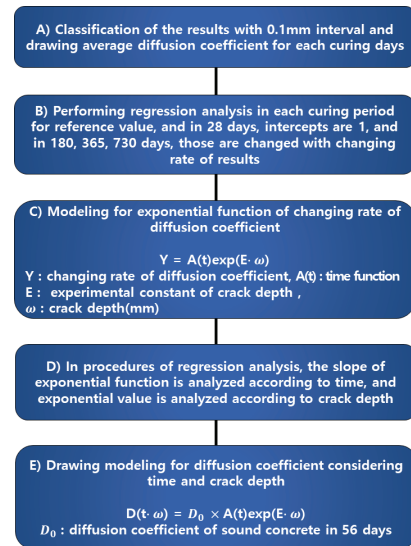


Fig. 7. Procedure of regression analysis for crack and curing effect

폭에 따른 확산계수의 변화는 일반적으로 비선형적으로 증가하므로 지수함수로 각각의 함수를 회귀분석 하는 것이 합리적이라고 판단된다.

4.2 재령 및 균열효과를 고려한 염화물 확산거동

4.1절의 정량화 분석절차를 이용하여 보통 강도 및 고강도 플라이애시 콘크리트 확산계수의 회귀분석 결과를 나타내면 Fig. 8 및 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 8 및 Fig. 9의 결과에서 알 수 있듯이 재령에 따른 건전부 콘크리트의 확산계수는 재령의 증가에 따라 지속적으로 감소하며, 균열 폭의 증가에 따른 확산성의 변화는 지수 함수 형태로 증가하였다. 건전부의 확산계수의 변화에 비하면, 균열의 증가에 따른 확산성의 증가는 비교적 일정하게 변화함을 알 수 있다. 회귀분석 결과 도출된 실험상수 A 와 E 의 값을 정리하면 Table 5와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 도시하면 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 전술한대로 A 는 재령에 대한 효과를 나타내고 E 는 균열 폭에 따른 효과를 나타내고 있다.

정상상태에서는 재령의 증가와 균열 폭의 증가에 따른 확산계

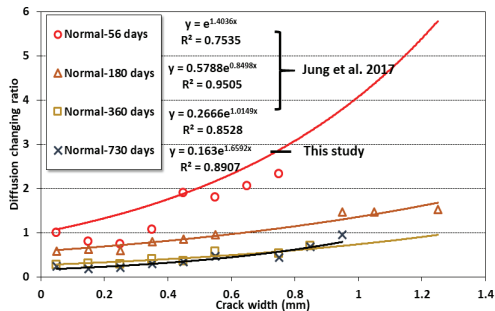


Fig. 8. Regression analysis results for crack and curing effect for normal strength concrete

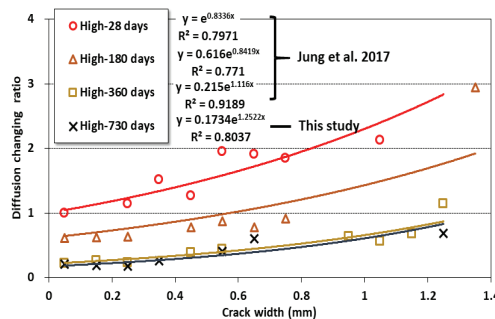


Fig. 9. Regression analysis results for crack and curing effect for high strength concrete

수의 일정한 경향을 발견하기 어려웠으며, 재령 6개월 이후부터는 E 값이 비교적 일정하게 증가하는 경향을 나타내었다. 반면 재령 효과는 매우 뚜렷하게 나타났는데, 두 가지 배합에 대하여 거의 비슷하게 시간에 대한 감소를 나타내고 있다. 이는 두 배합의 FA 치환률 수준이 20%로 거의 동일하기 때문이다. 두 배합의 평균값에 대해 시간에 따른 회귀분석을 수행하면 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(t) = 1.238\exp(-t/250), R^2=0.923 \quad (2)$$

여기서 t 는 재령(일)을 나타내고 있으며, 56일 이후를 대상으로 한다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 실험상수 E 에 대해서는 뚜렷한 경향을 확인할 수 없었으며 0.84~1.65의 범위를 가지고 있다. E 의 평균값인 1.12를 사용하면 식 (1)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t, w) = D_0 [1.238\exp(-t/250)] \exp(1.12w) \quad (3)$$

여기서 w 는 균열 폭(mm)을 나타낸다.

식 (3)을 이용하여 재령과 균열 폭을 고려한 확산계수를 Contour로 Fig. 11에 나타내었다.

Table 5. Analysis results for regression analysis of exponential function

Time(days)	A(normal)	E(normal)	A(high)	E(high)
56	1	1.4036	1	0.8366
180	0.5788	0.8498	0.616	0.8429
360	0.2666	1.0149	0.215	1.116
730	0.163	1.6592	0.1734	1.2522

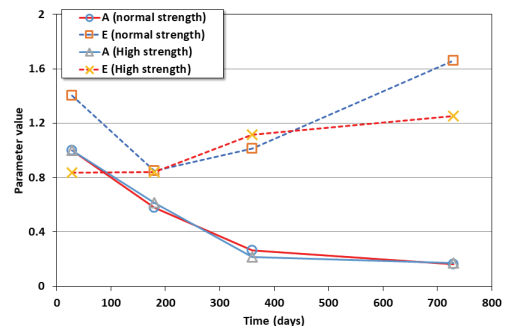


Fig. 10. Changing patterns of parameter(A and E)

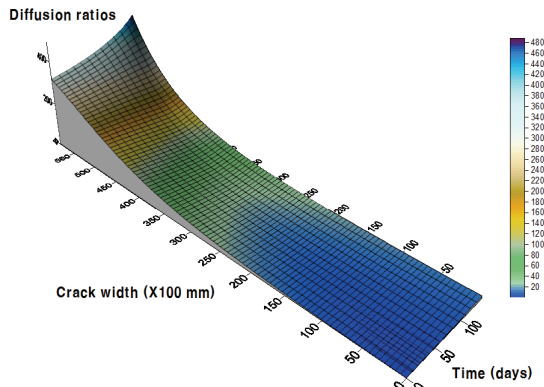


Fig. 11. Diffusion contour considering age and crack width

컨투어를 활용하여 염화물 확산 거동을 나타낸 결과 재령일의 증가와 상관없이 균열 폭에 의해 확산계수가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 내구성능 설계 시 이러한 균열에 의한 영향을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 균열을 유도한 후 2년간 수중 양생된 두 가지 강도의 플라이애시 콘크리트를 대상으로 정상상태 염화물 확산성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 균열효과를 선형적으로 비교하기 위해 건전부에 대하여 선형회귀분석을 수행하면, 재령이 증가할수록 두 가지 강도 시편에서 모두 기울기가 감소하였다. 전체적인 확산계수 값은 고강도 콘크리트가 매우 낮지만, 초기재령에서 고강도 콘크리트의 확산계수 값이 매우 낮으므로 상대적으로 일반 강도 콘크리트에 비해 감소율이 작게 평가되었다.
- 2) 건전부 및 0.1mm 이하의 작은 균열 폭에 대해서는 강도 등급이 다르더라도 시간에 따른 확산계수 감소는 일정한 비율로 감소하였다. 이는 두 가지 배합 모두 플라이애시 치환율이 동일하게 20% 수준이 적용되었기 때문이다. 또한 균열 폭의 증가에 따른 확산계수 증가 비는 재령 및 강도에 상관없이 일정하게 증가하였다.
- 3) 재령효과는 건전부 콘크리트의 확산에 지배적이며, 균열에 따른 확산효과는 재령 영향이 크지 않으므로 두 가지 독립영향을 고려하여 합리적으로 건전부 확산을 이용한 균열부 콘크리트 확산성 평가식을 제안할 수 있다고 사료된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2015R1A5A1037548).

References

Andrade, C. (1993). Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurement, *Cement and Concrete Research*, **23(3)**, 724–742.

Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, England, 1-15.

Cheon, J.H., Ryu, H.S., Yoon, Y.S., Kwon, S.J. (2017). Crack and time effect on chloride diffusion coefficient in nuclear power plant concrete with 1 year curing period, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **21(6)**, 83–90 [in Korean].

Chung, L., Jay Kim, J.H., Yi, S.T. (2008). Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars, *Cement and Concrete Composites*, **30(7)**, 603–611.

Gerard, B., Marchand, J. (2000). Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime, *Cement and Concrete Research*, **30(1)**, 37–43.

JSCE. (2002). *Concrete Library 109: Proposal of the Format for Durability Database of Concrete*, Japan Society of Civil Engineering (JSCE), Tokyo, Japan.

JSCE. (2007). *Standard Specification for Concrete Structures—Design; JSCE Guidelines for Concrete 15*, Japan Society of Civil Engineering (JSCE), Tokyo, Japan.

Jung, S.H., Ryu, H.S., Karthick, S., Kwon, S.J. (2017). Time and crack effect on chloride diffusion for concrete with fly ash, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **2018**, 1–10.

Kim, D.S., Lee, S.T., Lee, S.H., Kim, D.G., Seo, C.W., Ryu, D.H. (2009). “Strength and diffusivity of ternary cement concrete using pulverized fly ash,” *Academic conference of Korea Concrete Institute, KCI*, Seoul, Korea, 255–256 [in Korean].

Kwon, S.O., Bae, S.H., Lee, H.J., Jung, S.H. (2014). Characteristics for reinforcement corrosion and chloride ion diffusion of high

- volume fly ash concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **2(1)**, 34–39 [in Korean].
- Lee, M.H. (2016). Fundamental Properties of mortar and concrete using high calcium fly ash, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(3)**, 284–291 [in Korean].
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2009). Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, London, England.
- Nath, P., Sarker, P. (2011). Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete, Procedia Engineering, **14**, 1149–1156.
- Neville, A.M. (1995). Properties of Concrete fourth edition, Longman Group, London, England.
- Park, S.S., Kwon, S.J., Jung, S.H. (2012a). Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation, Construction and Building Materials, **29**, 183–192.
- Park, S.S., Kwon, S.J., Jung, S.H., Lee, S.W. (2012b). Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure, Construction and Building Materials, **27(1)**, 597–604.
- Park, S.S., Song, H.W., Byun, K.J. (2001). Model for chloride diffusivity and water permeability in cracked concrete, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, **21(6A)**, 915–924 [in Korean].
- Song, H.W., Cho, H.J., Park, S.S., Byun, K.J., Maekawa, K. (2001). Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure, Concrete Science Engineering, **3(10)**, 62–72.
- Win, P.P., Watanabe, M., Machida, A. (2004). Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete, Cement and Concrete Research, **34(7)**, 1073–1079.
- Zhou, Z., He, J.P., Chen, G.D., Ou, J.P. (2009). A smart steel strand for the evaluation of prestress loss distribution in post tensioned concrete structures, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, **20(16)**, 1901–1912.

재령 및 균열효과를 고려한 플라이애시 콘크리트의 정상상태 염화물 확산 특성의 정량화

콘크리트에 균열이 발생하는 경우 균열부로의 염화 이온의 침투가 확산되어 철근콘크리트 구조물에 구조적·내구적 문제를 야기한다. 본 연구에서는 보통 및 고강도 플라이애시 콘크리트를 대상으로 재령 56일에 최대 1.0mm까지 다양한 균열 폭을 유도한 후 재령 2년의 정상상태 촉진 염화물 확산계수를 평가하였다. 균열 효과를 선형회귀분석을 통해 고려하면 고강도 콘크리트는 보통 강도 콘크리트 보다 균열 폭에 의한 확산계수 증가가 다소 적었으며 균열 폭이 증가함에 따라 확산계수가 비선형적으로 증가하였다. 또한 두 가지 배합에서 재령이 증가할수록 균열에 의한 영향이 감소하였다. 지수함수 형태를 사용하여 균열 및 재령 효과를 정량화하는 경우, 선형회귀분석을 통한 경우보다 더 높은 결정계수를 나타내었다. 정상상태에서는 균열 효과와 재령의 영향 간의 상관성이 크지 않은 것으로 보이며 두 가지 독립영향을 고려하는 경우 합리적인 균열부 콘크리트 확산성 예측식을 제안할 수 있다고 사료된다.