

재령 및 배합특성을 고려한 보통 콘크리트의 강도, 염화물 확산계수, 통과전하량 변화 분석

Analysis on Changes in Strength, Chloride Diffusion, and Passed Charges in Normal Concrete Considering Ages and Mix Proportions

이학수¹ · 권성준^{1*}

Hack-Soo Lee¹ · Seung-Jun Kwon^{1*}

(Received January 9, 2017 / Revised March 13, 2017 / Accepted March 21, 2017)

Concrete behavior in early-age is changing due to hydration reaction with time, and a resistance to chloride attack and strength development are different characterized. In the present work, changing strength and resistance to chloride attack are evaluated with ages from 28 days to 6 months. For the purpose, strength, diffusion coefficient, and passed charge are evaluated for normal concrete with 3 different mix proportions considering 28-day and 6-month curing conditions. With increasing concrete age, the changing ratio of strength falls on the level of 135.3~138.3%, while diffusion coefficient and passed charge shows 41.8%~51.1% and 53.6%~70.0%, respectively. The results of chloride diffusion coefficient and passed charge show relatively similar changing ratios since they are much dependent on the chloride migration velocity in electrical field. The changing ratios in chloride behaviors are evaluated to be much larger than those in compressive strength since the ion transport mechanism is proportional to not porosity but square of porosity.

키워드 : 콘크리트, 염화물 확산계수, 재령, 통과 전하량, 공극률, 시간 의존성

Keywords : Concrete, Chloride diffusion coefficient, Age, Passed charge, Porosity, Time-dependency

1. 서론

콘크리트는 경제적이고 내구성 및 내화재성이 확보된 건설재료이지만, 염해에 노출된 콘크리트 구조물에서는 매립된 철근에 부식이 발생하기 쉽다. 부식이 발생한 콘크리트는 초기에 표면에서 녹이 발생하지만, 점차적으로 균열의 발생, 콘크리트 피복두께의 박락(delamination)이 발생하며, 최종적으로는 사용성 및 내구성의 저하로 이어진다(Broomfield 1997; Maekawa et al. 2003).

시멘트는 지속적인 수화반응을 통하여 수화물이 생성되고 생성된 수화물로 인해 공극이 감소된다(Metha and Monteiro 1993; Song et al. 2006). 이러한 공극의 감소와 수화물의 증가는 외부로부터 유입되는 염화물에 대하여 효과적으로 저항할 수 있는 기본 방어기제가 된다. 염화물 이동의 관점에서는 공극률의 감소는 확

산계수의 감소를 통하여 염화물 유입을 제어할 수 있으며(Song et al. 2006), 수화물의 증가는 자유염화물의 흡착 증가를 통하여 유입되는 자유염화물 이온의 확산을 저감시킬 수 있다(Ishida et al. 2007). 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag), 플라이애시(FA: Fly Ash), 실리카 폼(SF: Silica Fume)과 같은 혼화재료는 산업 부산물로서 환경부하 영향을 줄이고 장기적인 염해 저항성 개선에 매우 유리한 건설재료이다. GGBFS를 사용한 콘크리트는 잠재수경성 반응을 통하여 조직이 치밀화 되고, 염화물 고정화가 크게 발생한다(Jeong et al. 2015; Erdem and Kirca 2008). 초기강도 저하의 문제가 많이 보고되고 있으나, 단위수량이 확보된 HVSC(High Volume Slag Concrete)에서는 지연효과로 인해 강도저하가 상당히 보상되는 것으로 보고되고 있다(Jeong et al. 2015; Escalante et al. 2001). FA를 사용한

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

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

콘크리트에서는 장기적으로 염화물 고정량이 OPC(Ordinary Portland Cement)에 비하여 약간 낮은 수준이지만, 포졸란 반응으로 인해, 낮은 염화물 확산계수에 따른 높은 염해 저항성을 나타내고 있다(AI-Amoudi et al. 2009; Polder et al. 2007; Malvar and Lenke 2006). 또한 SF를 사용한 콘크리트에서는 초기 일부의 포졸란 반응과 높은 공극 충전효과로 인해 높은 내염해성을 나타내고 있다(Yuan et al. 2009; Song et al. 2007).

그러나 혼화재료를 사용하지 않더라도 OPC 콘크리트는 낮은 물-결합재를 사용할 경우 그 자체로도 높은 내염해성을 나타내고 있다. 특히 동일한 물-결합재(w/b: water-to-binder ratio)를 가진 콘크리트라 하더라도 결합재량이 높아질수록 수화물 생성량이 많아져서 효과적인 염화물 확산성이 감소하게 된다. 많은 연구들이 혼화재를 사용한 콘크리트에 대하여 강도 및 내구특성을 분석하였으나, 초기재령인 28일에서 6개월 기간동안 OPC 배합의 강도 특성과 염해특성 변화를 분석한 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 w/b를 0.37, 0.42, 0.47로 고려하여 시편을 제조하였다. 일반 강도 및 고내구성 콘크리트의 수준을 고려하여 총 3가지의 배합을 고려하였으며, 28일 재령 및 6개월 수중양생 된 시편을 대상으로 강도특성, 축진확산계수, 전하통과량 및 공극량의 변화를 정량적으로 분석하였다. 각 증가 또는 감소비율은 물-결합재비 특성을 고려하여 같이 고려되어 분석하였다.

2. 염해 저항성 평가를 위한 실험계획

2.1 콘크리트 배합

콘크리트 결합재료는 OPC를 사용하였으며, 화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. 사용된 골재 특성과 콘크리트 배합표는 Table 2와 Table 3에 제시되었다. 목표 슬럼프는 150±10mm으로, 공기량은 4.0±1.0%로 설정하였으며, w/b를 0.37, 0.42 및 0.47로 변화시켜 3개 배합의 콘크리트를 제조하였다.

2.2 염화물 축진시험(Tang's Method)

전위차에 의한 축진 염소이온 확산계수를 평가하기 위하여 확산셀을 구성하였다. 음극셀(Cell I) 용액은 0.5M의 염화나트륨(NaCl)용액을 사용하였으며, 양극셀(Cell II) 용액은 포화 수산화칼슘(sat. Ca(OH)₂)용액을 사용하였다. 또한 축진염화물 확산계수는 각 재령 및 배합에 대하여 3개의 시편을 제조하였으며 그 평균값을 결과로 사용하였다.

8시간 전위를 인가한 뒤, 시편을 쪼개어 표면에 0.1N의 AgNO₃

Table 1. Properties of OPC and GGBFS

Items	Chemical composition(%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214

Table 2. Physical properties of aggregate

Types	Items	Gmax (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate		-	2.58	1.01	2.90
Coarse aggregate		25	2.64	0.82	6.87

Table 3. Mix proportions for concrete

System	w/b ratio (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	Fine agg. (kg/m ³)	Coarse agg. (kg/m ³)	S.P (%)
OPC 100%	0.37	168	454	767	952	9.08
	0.42	168	400	787	976	8
	0.47	168	357	838	960	7.14

용액을 분무하였으며, 음극 측 표면에서부터 은색으로 변하는 지점까지의 깊이를 염소이온의 침투깊이로 측정하였다. 전위차 축진 시험법에 의한 비정상 상태의 염소이온 확산계수는 Tang's method을 이용하였으며, 염소이온 침투깊이로부터 축진확산계수 (D_{rcpt})를 도출하였다. 식 (1) 및 식 (2)는 축진확산계수 도출식을 나타낸다(Song and Kwon 2009; Tang 1996).

$$D_{rcpt} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - a\sqrt{d}}{t} \tag{1}$$

$$a = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erf}^{-1}\left[1 - \frac{2C_d}{C_0}\right] \tag{2}$$

여기서 D_{rcpt} 는 비정상상태에서 구한 전위차 축진 염소이온 확산계수(m²/sec), R 은 기체상수(8,314J/mol · K), T 는 절대온도(K), L 은 시편두께(m), z 는 이온전자가(=1.0), F 는 Faraday 상수(96,500J/V · mol), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 침투깊이(m), t 는 전위차 적용시간(sec), C_d 는 비색법에 의한 반응농도(mol/l), C_0 는 음극셀의 염소이온농도(mol/l)를 나타낸다.

2.3 전하통과시험(ASTM C 1202 및 KS F 2711)

ASTM C 1202 및 KS F 2711 방법에 따라 지름 100mm, 두께 50mm의 시편을 대상으로 전하량 통과시험을 수행하였다. 28일 및 6개월 수중 양생 기간 이후, 100mm×200mm의 실린더 시편을 커팅하여 두께 50mm의 디스크 시편을 제조하였다. 3%의 NaCl 수용액과 0.3M NaOH 수용액을 가진 셀에 60V의 전압을 인가하여 30분 간격으로 6시간까지 통과 전류량을 측정하였다. 식 (3)에서는 계산식을 나타내고 있는데, 60V의 전압기간 이후시편을 통과한 전류의 총 합은 염화물 침투 저항의 지표로 사용되고 있다 (ASTM C 1202, 2010; KS F 2711, 2012).

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

여기서 Q 는 총 투과 전류량(Coulombs)을 나타내고 있으며, I_0 는 전압을 인가한 후의 전류를, I_t 는 시간 t (분)이후의 측정 전류(Amp)를 나타낸다.

2.4 MIP를 통한 공극률 평가

공극은 수화과정에 따라 수분이 손실되고 이로 인해 비워진 부분이 공극으로 발생하게 된다. 재령에 따른 수화반응에 따라 공극률은 감소하게 되는데, 이는 외부양생조건과 밀접한 관계가 있다 (Park et al, 2009). 시멘트계 재료의 공극률 평가를 위해서는 화상 분석법, 질소흡착법, 수은압입법(MIP: Mercury Intrusion Porosimetry)이 있는데, 일반적으로 수은압입법이 많이 사용되고 있다(Park et al, 2009; Kim et al, 2008). 본 실험에서는 시멘트 모르타르 시편을 분석이 가능하게 작은 조각으로 파쇄한 후, 수화정지를 위하여 아세톤에 24시간 침지시켰다. 이후 105℃의 건조로에서 24시간 동안 건조시킨 후 미세공극을 측정하였다. Table 4에서는 공극률 평가를 위한 실험조건을 나타내고 있다.

Table 4. Conditions for porosity evaluation(MIP)

Contacting angle	130°
Mercury surface tension	485dyne/cm
Maximum head pressure	4.45psi
Stem volume	0.392ml
Bulb volume	5cc
Penetrometer constant	10.79/pF
High pressure measurement	33,000psi

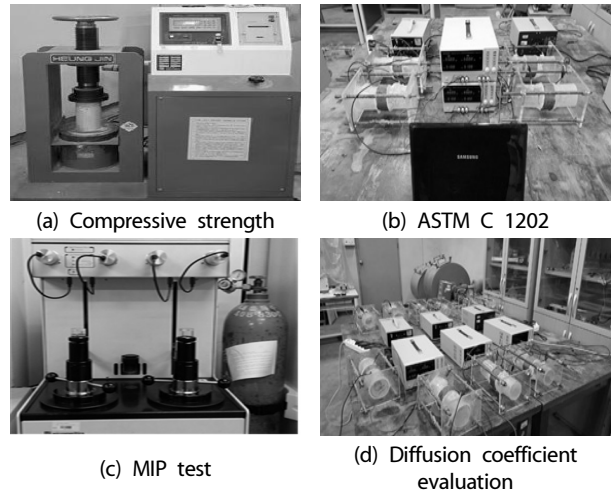


Fig. 1. Photos for the tests in the study

2.5 압축강도시험

압축강도 평가를 위해 100×200mm 실린더 시편이 사용되었으며, 3개 시편의 평균값을 사용하였다. KS F 2405에 따라 재령 28일 및 6개월 시편의 강도 평가를 수행하였다. Fig. 10에서는 본 연구에서 수행된 실험사진을 나타내었다.

3. 재령 및 w/b 비에 따른 변화 평가

3.1 재령 및 w/b 비에 따른 내구성능 및 강도 평가

3.1.1 강도특성 및 공극률의 변화

본 절에서는 재령이 28일에서 6개월로 증가한 OPC 콘크리트에 대하여 기술하도록 한다. Fig. 2에서는 재령의 변화에 따른 강도변화를 나타내었다.

실험결과는 전형적인 강도발현을 나타내었는데, 낮은 w/b와 재령의 증가에 따라 증가하였다. w/c 0.37의 경우 45.8MPa에서 62.2MPa로 증가하였으며, w/c 0.42에서는 42.3MPa에서 58.5MPa로, w/c 0.47에서는 32.9MPa에서 44.5MPa로 각각 증가하였다.

강도 증가율은 135.2~138.3%로 배합에 따른 큰 차이는 보이지 않았다. 공극특성의 경우, 6개월에 해당하는 자료가 아직 입수되지 않아서 28일 재령에 해당하는 결과만을 분석하였다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 w/b의 증가에 따라서 공극률이 크게 발생하였는데, 이는 단위 시멘트량의 증가에 따른 수화물의 증가와 이로 인한 공극구조의 개선이 주된 원인이다(Metha and Monteiro 1993; Park et al, 2009).

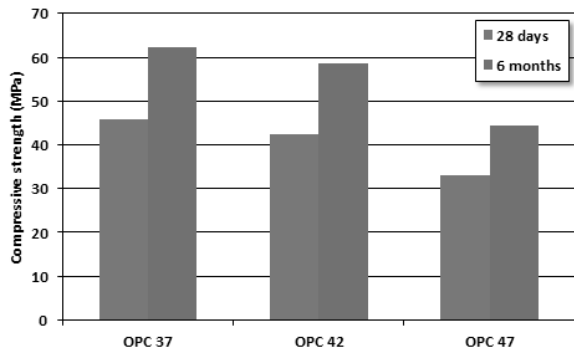
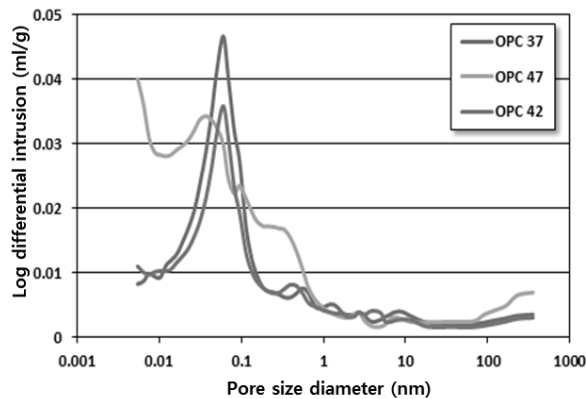
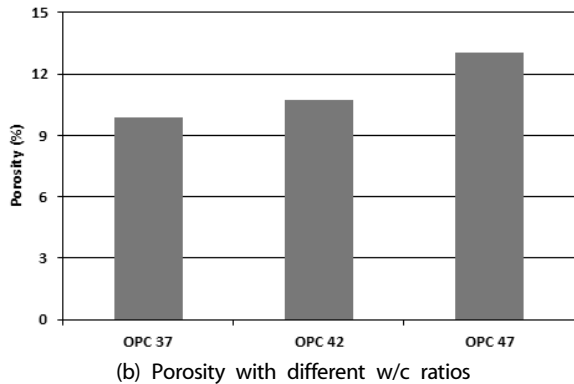


Fig. 2. Compressive strength evaluation(28-days and 6-months)



(a) PSD(Pore Size Distribution) with different w/b ratios



(b) Porosity with different w/c ratios

Fig. 3. PSD and Porosity in OPC concrete with different w/c ratios

3.1.2 염해저항성능 변화

1) 확산계수의 재령에 따른 변화

w/c의 증가에 따라 확산계수는 증가하였으며, 재령이 증가함에 따라 각 배합의 확산계수는 크게 감소하였다. 이는 OPC 배합이 GGBFS 및 FA를 혼입한 배합보다 비교적 낮게 확산계수 감소가 평가된다 하더라도, 재령에 따라서 크게 확산계수 감소가 발생하

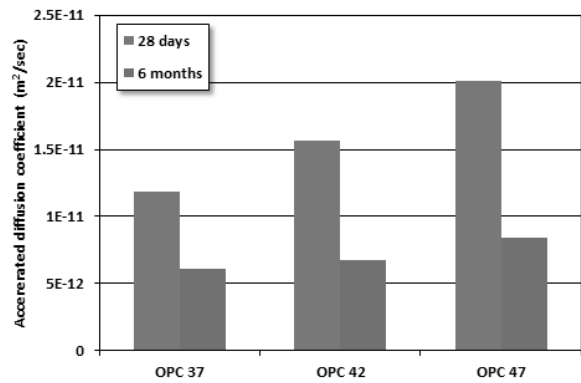


Fig. 4. Accelerated diffusion coefficient with different w/b ratios

고 있음을 알 수 있다. w/b 0.37의 경우 재령이 28일에서 6개월로 증가하면서 $11.89 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $6.07 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 감소하였으며, w/b 0.42의 경우 $12.68 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $6.75 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 감소하였다.

또한 w/b 0.47의 경우 $20.15 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $8.42 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 감소하였는데, 시간에 따른 감소율은 41.8%(w/c 0.47), 43.0%(w/c 0.42), 51.1%(w/c 0.37) 수준으로 평가되었다. 기존의 연구와는 약간 다른 시간의존성이 평가되었는데, w/b가 낮고 단위 바인더가 증가할 경우 확산계수의 시간에 대한 감소율이 크게 보고되고 있다(Lee and Kwon 2012). 이는 재령의 증가를 고려하여 지속적으로 확산계수를 평가할 필요가 있다. Fig. 4에서는 재령과 w/b의 변화에 따른 촉진확산계수의 변화를 나타내고 있다.

2) 통과 전하량의 재령에 따른 변화

Fig. 5에서는 재령에 따른 통과전하량의 변화를 나타내고 있다. 지속적인 수화반응에 따라서 통과전하량은 크게 감소하였으며, w/b의 증가에 따라서 통과전하량은 증가하였다. 이는 확산계수와 같은 경향을 나타내는데, 비정상상태의 확산성은 전기장 내에서의 통과전하에 의존하기 때문이다.

28일 재령에서 w/b가 0.37, 0.42, 0.47로 증가할수록 통과전하량은 4494.6 C, 5266.8 C, 6863.4 C로 증가하였다. 그러나 6개월 경과시 모든 배합에서 통과전하량은 감소하였으며, 2408.4 C, 3380.4 C, 4597.2 C로 평가되었다. 각 배합에 따른 감소율은 53.6%(w/c 0.37), 64.2%(w/c 0.42), 70.0%(w/c 0.57)로 평가되었다. 또한 기존의 연구에서는(Berke and Hicks 1992) 통과전하량에 따른 유효 확산 계수를 제안하였는데, 통과전하량을 확산계수로 환산한 식은 (4)과 같으며, 그 결과를 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

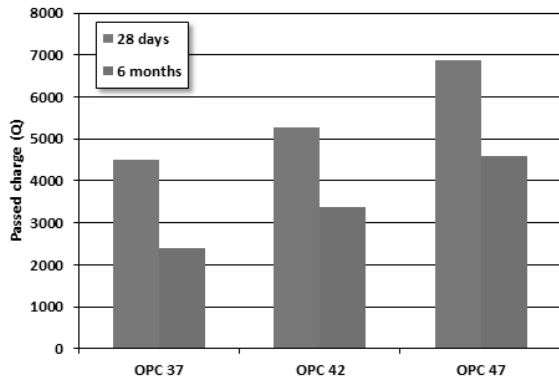


Fig. 5. Passed charges with different w/c ratios

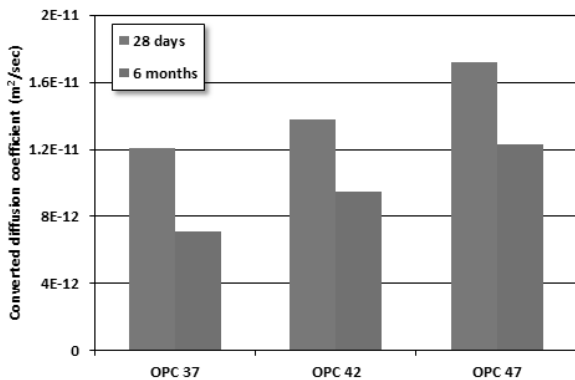


Fig. 6. Diffusion coefficient from passed charges

$$D_{eff} = 0.0103 \times (Q_{total})^{0.84} \times 10^{-12} \quad (4)$$

3.2 w/b 및 재령효과 분석

본 절에서는 각 배합에 따른 재령효과에 대하여 분석하도록 한다. 강도증가는 w/b가 0.37에서 0.42로 증가할수록 증가율은 135.7%, 138.3%, 135.3%로 각각 평가되었으며 배합에 따른 큰 차이는 발생하지 않았다. 그러나 축진확산계수의 경우 51.1%, 43.0%, 41.8%로 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 강도발현에 따른 영향보다 28일 재령이후에 빠르게 염해 저항성이 개선되고 있음을 나타내고 있다. 이는 강도가 발현되는 기구, 즉 수화물이 팽창하여 단위 체적 내에서 하나의 연결고리가 되는 기구(Percolation)가 진행된 이후의 수화물 흡착과 염화물 이온의 유입이 급격하게 감소하게 됨을 알 수 있다(Cho et al. 2016). 변동성이 있으나 강도는 공극률의 비례하는 것으로 알려져 있지만(Metha and Monteiro 1993; Park et al. 2009), 투수이론에서는 공극률에 비례하지 않고 공극률의 제곱에 비례하여 수분이 이동이 감소하고 있음을 알 수

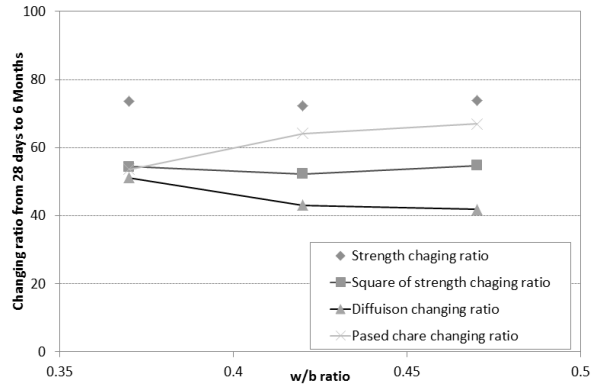


Fig. 7. Changing ratios of strength, diffusion coefficient, and passed charges

있다(Song and Kwon 2007).

통과전하량의 변화 역시, 53.6%, 64.2%, 70.0%로 재령의 증가에 따라서 감소하였다. 강도증가비의 역수를 염화물 저항성과 같은 개념으로 비교하면, 강도증가비의 역수의 제곱이 확산계수의 감소비와 통과전하량의 감소비와 비슷한 경향을 나타내고 있다. Fig. 7에서는 강도감소, 확산계수, 통과전하량의 감소 비를 비교하였다.

4. 결론

OPC 자체만으로도 재령이 증가함에 따라 염화물 저항성은 크게 증가한다. 본 연구에서는 3가지 배합을 가진 OPC 콘크리트에 대하여 28일 재령 및 6개월 재령에 대한 강도, 확산계수, 통과 전하량에 대한 변화를 분석하였으며, 강도 및 염해 저항특성의 변화를 비교하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 재령이 28일에서 6개월로 증가하면서 w/c 0.37에서는 $11.89 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $6.07 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 감소하였으며, w/c 0.42의 경우 $12.68 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $6.75 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 감소하였다. 또한 w/c 0.47의 경우 $20.15 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 에서 $8.42 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 감소하였다. 이는 시간의 증가에 따라 수화물이 지속적으로 팽창하고 이에 따른 공극률 감소 및 염화물 이온의 흡착량 증가가 주된 원인이다. ASTM C 1202에서 제시한 통과전하량에 대해서는 재령이 28일에서 6개월로 증가함에 따라 통과전하량은 4494.6C에서 2408.4C(w/c 0.37), 5266.8C에서 3380.4C(w/c 0.42), 6863.4C(w/c 0.47)로 감소하였다.
2. 강도증가는 재령이 28일에서 6개월로 증가하면서 135.7%(w/c 0.37), 138.3%(w/c 0.42), 135.3%(w/c 0.47)로 각각 평가되었

으며 각 배합에 따른 큰 차이는 발생하지 않았다. 그러나 촉진 확산계수의 경우 51.1% (w/c 0.37), 43.0%(w/c 0.42), 41.8%(w/c 0.47) 수준으로 감소하였으며, 통과전하량의 변화 역시, 53.6%(w/c 0.37), 64.2%(w/c 0.42), 70.0%(w/c 0.47) 수준으로 재령의 증가에 따라서 감소하였다. 염해 저항성은 강도 변화비보다 강도 변화의 제곱비에 근접하였는데, 물질이동에 대한 영향은 공극률보다 공극률의 제곱에 비례하기 때문이다. 다만 장기적인 관점에서 각 물-결합재 비의 변화에 따른 강도 및 염해저항특성은 추가적으로 연구되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 한남대학교 교내 연구비의 지원을 받아 수행되었으며 저자는 이에 감사드립니다.

References

- Al-Amoudi, O.S.B., Al-Kutti, W.A., Ahmad, S., Maslehuddin, M. (2009). Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes, *Cement and Concrete Composites*, **31(9)**, 672–676.
- ASTM C 1202. (2010). Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, *Annual Book of ASTM Standards*, **4(2)**.
- Berke, N.S., Hicks, M.C. (1992). The Life Cycle of Reinforced Concrete Decks and Marine Piles Using Laboratory Diffusion and Corrosion Data, *Corrosion Forms and Control of Infrastructure*, 207–231.
- Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1–15.
- Cho, H.J., Kang, J.W., Ahn, Y.H., Kim, S.K., Wang, X.Y. (2016). A New Microstructure Development Model for the Evaluation of Concrete Setting Time, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2016**, 1–10.
- Erdem, T.K., Kirca, O. (2008). Use of binary and ternary blends in high strength concrete, *Construction and Building Materials*, **22(7)**, 1477–1483.
- Escalante, J.I., Gómez, L.Y., Johal, K.K., Mendoza, G., Mancha, H., Méndez, J. (2001). Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions, *Cement and Concrete Research*, **31(10)**, 1403–1409.
- Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T. (2007). Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, **37**, 565–578.
- Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, S.I. (2015). Effects of replacement ratio and fineness of GGBFS on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength high-volume GGBFS blended cement pastes, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(2)**, 115–125 [in Korean].
- Kim, T.S., Jung, S.H., Chae, S.T., Lee, B.C., Woo, Y.J., Song, H.W. (2008). An experimental study on the microstructure characteristics of cementitious composites by MIP, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **20(1)**, 533–536 [in Korean].
- Korean Standards, Testing Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, KS F 2711, 2012, 1–12 [in Korean].
- Lee, S.H., Kwon, S.J. (2012). Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(6)**, 715–726 [in Korean].
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1(2)**, 91–126.
- Malvar, L.J., Lenke, L.R. (2006). Efficiency of fly ash in mitigating alkali silica reaction based on chemical composition, *ACI Materials Journals*, **103(5)**, 319–326.
- Metha, P.K., Monteiro, P.J.M. (1993). *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, New Jersey.
- Park, S.S., Kwon, S.J., Kim, T.S. (2009). An experimental study on the durability characterization using porosity, *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, **29(2A)**, 171–179 [in Korean].
- Polder, R.B., Van Der Wegen, G., Boutz, M. (2007). Performance Based Guideline for Service Life Design of Concrete for Civil Engineering Structures – A Proposal Discussed in the Netherlands, *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, 19–21.

- Song, H.W., Jang, J.C., Saraswathy, V., Byun, K.J. (2007). An estimation of the diffusivity of silica fume concrete, *Building and Environment*, **42(3)**, 1358–1367.
- Song, H.W., Kwon, S.J. (2007). Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, **37(6)**, 909–915.
- Song, H.W., Kwon, S.J. (2009). Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure, *Cement and Concrete Research*, **39(9)**, 814–824.
- Song, H.W., Pack, S.W., Lee, C.H., Kwon, S.J. (2006). Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, *Journal of Restoration of Building and Monument*, **12(4)**, 265–284.
- Tang, L. (1996). Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete—current development, *Magazine of Concrete Research*, **48(176)**, 173–179.
- Thomas, M.D.A., Bamforth, P.B. (1999). Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, **29(4)**, 487–495.
- Yuan, Q., Shi, C., De Schutter, G., Audenaert, K., Deng, D. (2009). Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment—A Review, *Construction Building Materials*, **23**, 1–13.

재령 및 배합특성을 고려한 보통 콘크리트의 강도, 염화물 확산계수, 통과전하량 변화 분석

초기재령에서의 콘크리트 거동은 시간의 증가에 따른 수화반응에 따라 변화하는데, 염해 저항성과 강도 특성은 다르게 변화한다. 본 연구에서는 재령이 28일에서 6개월로 증가하면서 변화하는 강도 및 염해 저항특성을 보통 콘크리트에 대하여 분석하였다. 이를 위해 3개의 물-시멘트비를 가진 일반 콘크리트에 대하여, 재령 28일과 6개월 수중양생을 수행하였으며, 강도, 염화물 확산계수, 통과전하량을 평가하였다. 재령이 28일에서 6개월로 증가하면서 강도변화는 135.3~138.3% 수준으로 증가하였으나, 염화물 확산계수의 경우 41.8%~51.1% 수준으로, 통과전하량의 경우 53.6%~70.0% 수준으로 감소하였다. 염화물 확산계수와 통과전하량의 경우는 비교적 비슷한 수준으로 감소하였는데, 두 결과는 전기장 내에서의 염화물 이동에 지배적이기 때문이다. 또한 강도의 변화비보다 염화물 확산계수 및 통과전하량의 변화비가 크게 증가하였는데, 이는 공극특성의 제곱에 비례하여 물질이동 특성이 변하기 때문이다.