pISSN 1598-2033
eISSN 2233-5706

J. Korea Inst. Build. Constr. Vol. 18, No. 6 : 533-541 / Dec, 2018
https://doi.org/10.5345/JKIBC.2018.18.6.533

www.jkibc.org

실리케이트 함침제를 사용한 콘크리트의 내구수명 평가

Evaluation of Service Life of Silicate Impregnated Concrete

김 혁 중[1] 장 승 엽[2] 윤 용 식[3] 권 성 준[4*]

Kim, Hyeok-Jung[1] Jang, Seung-Yup[2] Yoon, Yong-Sik[3] Kwon, Seung-Jun[4*]

Professor of Industry Academic Cooperation, Industry Academic Cooperation Foundation, Hankyong National University, Anseong-Si, Gyeonggi-Do, 17579, Korea [1]

Associate Professor, Department of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Uiwang-Si, Gyeonggi-Do, 16106, Korea [2]

Ph.D. course, Department of Civil Engineering, Hannam University, Daedeok-Gu, Daejeon, 34430, Korea [3]

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hannam University, Daedeok-Gu, Daejeon, 34430, Korea [4]

Abstract

Chloride attack, one of the major deterioration phenomena in RC(Reinforced Concrete) structure, causes corrosion of reinforcement, and this leads degradation of serviceability and structural problems. The application of silicate based impregnant to concrete surface are known for excellent constructability and cost-benefit for the maintenance of RC structure. In the work, the compressive strength and resistance of chloride diffusion for concrete were evaluated after improving property of concrete surface through two types of silicate based impregnant. Furthermore, based on the previous research and the result from the work, service life analysis was performed. After impregnating of silicate, strength and resistance of chloride diffusion were remarkably improved, and the service life increase to 159% for silicate A impregnation and 304% for silicate B impregnation, respectively.

Keywords : coloidal silica, sodium alumina silicate, chloride ion, RCPT, service life

1. 서 론

염해에 노출된 구조물은 사용기간의 증가에 따라 매립된 철근의 부식이 발생하며, 이로 인해 사용성 및 구조 안전성의 저하가 발생한다[1,2]. 여러 할로겐 이온 중 염화물 이온(Cl^-)은 이온의 전파속도가 가장 빠르며, 철근의 국소적인 부식(Local corrosion-pitting)을 야기하므로[3], 각국의 시방규정 또는 지침에서 염해에 대한 내구성 설계 및 물성 평가를 수행하도록 규정되어 있다[4,5,6]. 최근 들어 RC 구조물의 경우 장기간의 내구수명을 요구받게 되며 이에 따라 유지관리의 중요성이 부각되고 있는데, 대규모의 보강 또는 대단위 수선에 이르기 전에 다양한 표면 보수에 대한 연구가 진행중이다. 특히 표면 함침제(Surface Impregnation)의 적용은 특별한 교통통제 또는 표층 콘크리트의 제거 없이 수행할 수 있으므로 매우 효과적이다[7,8,9]. 단순한 외부 열화인자의 차폐를 위해서는 유기계 표면보호재의 사용이 경제성 면에서 선호되지만, 표면 열화이외에 다양한 문제점을 가지게 된다. 특히 구체 콘크리트와의 물리적인 차이점이 발생하는데, 체적변화성(Dimensional Stability)으로 인한 균열 발생이 대표적이다. 콘크리트 구체와 다른 온도 및 습도에 따른 거동은 장기적으로 보수층과 박리(Delamination)를 야기하며, 수분이 배면으로 야기되는 조건에서 이러한 영향은 더욱 가속화된다[10,11].

최근 들어 표면 보호기법 중 실리케이트 기반 표면함침제

Received : July 11, 2018
Revision received : September 12, 2018
Accepted : November 27, 2018
* Corresponding author : Kwon, Seung-Jun
[Tel: 82-42-629-8020, E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr]
ⓒ2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

의 개발은 콘크리트에 잔존하는 수산화칼슘과 모세관 현상을 통해 침투한 실리케이트와의 반응을 통해 콘크리트와 동일한 재질로 표면의 강화층을 형성하는 효과를 갖고 있다[7,8,9]. 침투층을 증가시키기 위해 가수 분해된 실리케이트, 규산염계 실리케이트 등 점도와 표면장력을 고려하여 다양한 표면 강화재료가 개발되고 있다[12].

콘크리트 구조물의 내구수명 예측은 구조물의 안정성 및 사용성 평가에 매우 중요하다. 염화물 확산계수의 시간의존적으로 감소하는 경향을 고려하게 되면 염해에 대한 과다설계를 제어할 수 있다[13]. 본 연구에서 사용한 Life 365 모델을 활용하면 시간의존성지수를 통해 재령의 증가를 고려한 염해에 대한 내구수명을 평가할 수 있으며 최근 국내에서는 이 모델을 사용한 염해에 대한 내구수명 평가가 활발히 이루어지고 있다[14].

본 연구에서는 두 가지 종류의 실리케이트 기반 함침제를 보통 강도를 가진 콘크리트에 적용하여 함침제의 종류에 따라 변화하는 염해에 대한 내구수명을 평가하였다. 이를 위해 함침 조건을 다르게 하여 최적의 함침조건을 도출하였으며, 강도 변화 및 염화물 확산특성을 평가하였다. 본 논문에서는 실리케이트 함침 콘크리트의 역학적, 내구적 개선효과와 이를 통한 내구수명의 변화가 정량적으로 고찰될 것이다.

2. 표면 함침 콘크리트의 염화물 저항성 평가

2.1 표면함침 콘크리트의 성능개선 메커니즘

실리카 용액은 입자가 구형이고, 수중에서는 콜로이드 상태로 분산된다. 입자의 표면은 Si-OH와 OH^- 이온들이 존재하여 음 전하를 형성하고, 알카리 이온인 Na^+에 의해 전기적 이중층의 형성이 발생한다. 입자간의 반발에 의한 안정화를 유도하며, 이러한 현상은 분자 결합작용, 응고 과정 및 겔화 현상의 유도 등 일련의 효과를 나타낸다.

표면침투제 용액인 실리케이트($Na_2O \cdot SiO_2$) 성분은 포졸란 반응 시 비활성화 된 수산화칼슘과의 화학 반응에 의해 CSH(Calcium Silicate Hydrate) 또는 CAH(Calcium Aluminate Hydrate) 형태로 모세관 공극에 생성되는데, 이로 인해 모세관내의 공극량이 감소되는 특징이 있다. 표면침투제 용액을 적용한 콘크리트는 역학적 성능과 내구성이 개선되는 것으로 알려져 있는데, 이는 추가적인 수화물의 생성과 이로 인한 공극체적의 감소로 설명할 수 있다. 식(1) 및 식(2)에서는 실리카의 침투에 따른 규산나트륨의 형성과 추가적인 수산화칼슘과의 반응을 통한 불용성의 CSH의 형성과정을 나타내고 있다[9,12].

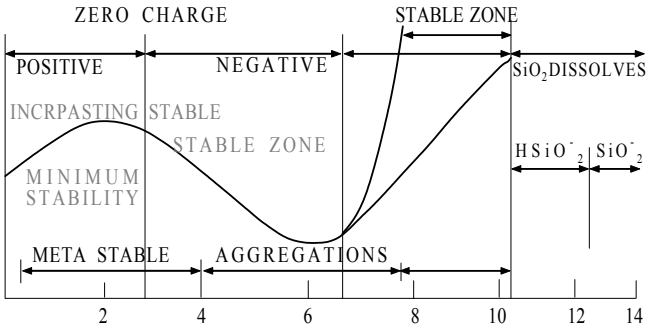


Figure 1. Stable zone with pH variation in silicate solution[12]

$$nSiO_2 + nNa_2CO_3 \rightarrow nNa_2O \cdot SiO_2 + nCO_2 \quad \text{--------- (1)}$$

$$Na_2SiO_3 + yH_2O + xCa(OH)_2 \rightarrow xCa \cdot SiO_2 \cdot yH_2O + 2NaOH \quad \text{-- (2)}$$

또한 표면침투제의 성능에서는 표면장력과 점도가 매우 중요한데, 침투깊이에 직접적으로 영향을 미치기 때문이다. 이외에도 표면 침투제의 포졸란 반응 활성화는 제타전위(Zeta Potential)로 설명되는데, 분자간의 반발력이 응집이나 표면흡착을 방해할 정도로 크지 않아야 효과적이다. 이러한 현상은 Figure 1과 같이 표면 침투제의 pH가 8~10의 범위에 있어야하는 것으로 알려져 있다[12].

2.2 실험계획

2.2.1 사용재료 및 배합

본 연구는 실리케이트 함침 콘크리트의 내구성능 평가에 대한 기초적인 연구로서 24MPa의 배합강도를 가지는 OPC 배합을 바탕으로 수행되었다. 목표설계 강도 및 배합수준은 콘크리트의 매우 보편적인 범위이며, 본 연구의 콘크리트 배합을 Table 1에 나타내었다. 이 배합은 슬럼프 80mm, 공기량 5.0%를 나타내었다. 또한 사용된 골재 및 고성능 감수제의 특성은 Table 2 및 Table 3에 나타내었다. 폴리카본산계 혼화제는 나프탈렌계 혼화제보다 슬럼프 유지 성능이 우수할 뿐만 아니라 조기강도 발현에 효과적이다[15]. 또한 본 연구에서 사용한 Silicate-A 용액의 경우 안정성이 우수하여 장기간 보관이 가능하기 때문에 현장 사용성이 우수하며, 콘크리

트에 적용하게 되면 강도 증진, 부착성능 개선 및 충진 등의 효과를 나타내고 친수성을 나타내는 장점이 있다. Silicate -B용액은 기존 표면 침투제의 성능이 개선된 용액으로서 콘크리트에 적용 시 고밀도 표면층 형성에 의한 표면강도 증진 및 발수 기능을 갖는 장점이 있다[12]. 최근 들어 하이브리드계 실리카등이 많이 개발되기는 하지만, 가장 일반적이며 경제적인 실리케이트 계통은 Colloidal계와 Sodium Alumina계 이므로 위의 두 가지 용액을 선정하였다.

Table 1. Mix proportions for test

W/C	S/a (%)	Unit content(kg/m³)				SP (%)
		W	C	S	G	
0.48	43	160.0	334.9	743.8	1,028.8	1.1

Table 2. Physical properties of aggregate

Type	G_{max}(mm)	Absorption ratio (%)	Density	F.M.*
Fine Agg.	-	1.78	2.53	2.68
Coarse Agg.	25	1.64	2.65	6.68

F.M. : Fineness Modulus

Table 3. Properties of super plasticizer

Type	Main component	pH	Density	Color
Liquid	Poly-carbon	6.5±1.0	1.06±0.05	Dark brown

Table 4. Components of Silicate based impregnant

Case	Type	Particle size (μm)	Na_2O and SiO_2 (%)	pH	Density	Viscosity (mPa.s)
Silicate -A	Colloidal Silica	10 - 20	below 0.6 29 - 31	9.5 - 10.5	1.19 - 1.21	below 10
Silicate -B	Sodium Alumina Silicate	10 - 20	below 7.5 29 - 31	9.5 - 10.5	1.13 - 1.17	below 5

Table 4에 본 연구에서 사용한 실리케이트 용액들의 특성을 나타내었다.

2.2.2 양생 및 실험조건

본 연구에서는 2.1절의 메커니즘을 고려하여 실리케이트 함침에 의한 추가적인 수화물의 생성이 내구성능 개선에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자한다. 따라서 콘크리트 시편을 탈형한 후 50mm 두께로 커팅한 다음 28일간의 기건양생을 거친 후 두 가지 실리케이트 용액에 1회 10 초간 침지하였다. 그 이후 촉진 염화물 확산 실험의 전처리 과정을 거쳐 통과 전하량을 평가하였다. 또한 실리케이트 용액에 함침 시킨 1주 및 2주 경과 시에 압축강도와 통과 전하량을 평가하여 내구성능의 변화를 분석하였다.

2.3 촉진 염화물 확산 실험

2.3.1 RCPT 시험에 따른 염화물 이온 침투 저항성

본 시험은 ASTM C 1202에 준용하여 촉진염화물 통과시험(RCPT: Rapid Chloride Penetration Test)을 수행하였다. 콘크리트 시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 가하여 콘크리트 시험체의 공극 내에 존재하는 염소이온의 이동을 평가하였다[16]. 시험의 세부 단계로는 공극이 증류수로 포화된 콘크리트 시험체를 두께 50mm로 절단하여 양극셀에서 0.3M의 NaOH 수용액을, 음극셀에는 3%의 NaCl 수용액을 채우고 DC 60 V의 전위차로 6시간 동안 통전시키면서 시간대별 전류 값을 측정하여 통과전하량을 산정한다. 통과전하량은 측정된 전류 값을 다음의 식(3)에 의하여 6시간 동안의 총 통과전하량을 산정한다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \cdots + 2I_{330} + I_{360}) \quad \text{------} \quad (3)$$

여기서, Q는 총 통과전하량(Coulomb), I_X는 x분에서의 전류 값(A)을 나타낸다.

식(3)으로부터 계산된 총 통과전하량을 통해 Table 5와 같은 기준으로 염소이온 침투저항성을 평가하게 된다. Figure 2에서는 염소이온 침투시험사진을 나타내고 있다.

Table 5. Criteria of total passed charge[16]

Total Passed charge(Coulomb)	Resistance to chloride penetration
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Midium
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
< 100	Negligible

Figure 2. Photo for RCPT-ASTM C 1202

(a) CaOH solution preparation

(b) Vacuum desiccator

Figure 3. Photo for RCPT preparation

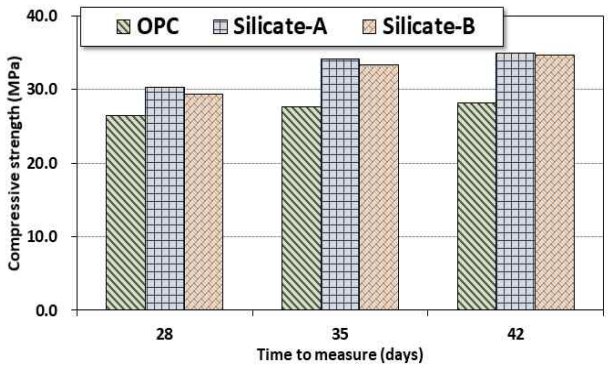


Figure 4. Compressive strength variation with silicate impregnation

2.3.2 콘크리트 시편의 전처리 과정

염소이온의 확산실험을 위해 50mm 두께로 절단된 후 실리케이트 용액에 침지된 콘크리트 시편에 대해 진공 데시게이터를 사용하여 아래와 같이 전처리를 수행하였으며 이후 염소이온 침투 저항성을 시험하였다. 먼저 실리케이트 침지가 완료된 시편의 측면에 에폭시를 도포하여 경화 시킨 후 세공 용액에 의한 영향을 최소화시키기 위해 3시간 동안 진공 데시게이터에서 133Pa의 진공 상태를 유지시켰다. 진공으로 유지되고 있는 데시게이터에 증류수를 주입 후 1시간동안 진공상태를 유지하였으며, 데시게이터를 개방 후 수중에서 18±2시간 동안 침지시켰다. Figure 3에서는 셀에 수산화나트륨 주입과정 및 진공유지사진을 나타내고 있다.

3. 표면함침층을 고려한 내구수명 평가

3.1 실리케이트 함침 콘크리트의 염화물 저항특성 평가

3.1.1 재령에 따른 실리케이트 콘크리트의 강도 특성

전술한대로 콘크리트 내부에 침투된 실리케이트 용액은 내부의 수산화칼슘과 반응하여 체적의 팽창과 공극률을 감소시키므로 콘크리트의 강도가 일부 증가하게 된다. 기존의 많은 연구에서도 강도 증가에 대한 연구결과는 보고되고 있다[7,9]. Figure 4에서는 재령의 증가와 함침조건에 따른 강도 특성의 변화를 나타내고 있다. Figure 4에서 알 수 있듯이 OPC에서는 재령이 28일에서 42일로 2 주 증가함에 따라 26.5MPa에서 28.2MPa로 106.2% 증가하였다. 실리케이트 A의 경우 30.3MPa에서 35.0MPa로, B의 경우 29.4MPa에서 34.7MPa로 증가하였다. 28 일 OPC 강도를 기준으로 하면 130.1~132.0% 수준으로 증가하였음을 알 수 있다.

3.1.2 재령에 따른 실리케이트 콘크리트의 염화물 침투저항성능

1) 통과전하량의 변화

실리케이트의 침투로 인한 염화물 침투저항성은 단지 공극률의 감소에 따른 확산저항성 증가뿐 아니라 자유염화물을 구속해주는 수화물의 양의 증가에도 기인한다. 염화물 고정화에 대한 화학적 특성으로는 일반적으로 경화된 콘크리트에 존재하는 염화물의 형태가 철근 부식에 영향을 미치는 가용성 염화물이온과 직접적인 영향을 미치지 않는 프리델염(Friedel's salt : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)으로 구분된다. 따라서 시멘트가 수화되어 경화될 경우 염화물이 존재하면 C_3A 수화물인 모노설페이트(Monosulfate, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$)와 염화물이 반응하여 식(4)와 같이 반응성이 없는 프리델염 복합물이 생성된다[17].

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O + CaCl_2 \rightarrow C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O + CaSO_4 \quad -- (4)$$

본 연구에서 사용한 표면침투제의 효과로써 염화물의 고정화 메카니즘은 표면침투제의 주성분인 실리케이트 물질이 콘크리트 내부에 침투되어 C_3A 수화물인 monosulfate의 고정화 반응과 흡사하게 염화물 이온과 반응하여 식(5)와 같이 침식성이 없는 규산염 겔($SiO_2 \cdot 2NaCl$)의 형성에 따라 염화물 이온 감소 효과를 확인할 수 있다[17].

$$Na_2O \cdot SiO_2 + CaCl_2 + H_2O \rightarrow SiO_2 \cdot 2NaCl + Ca(OH)_2 \quad -- (5)$$

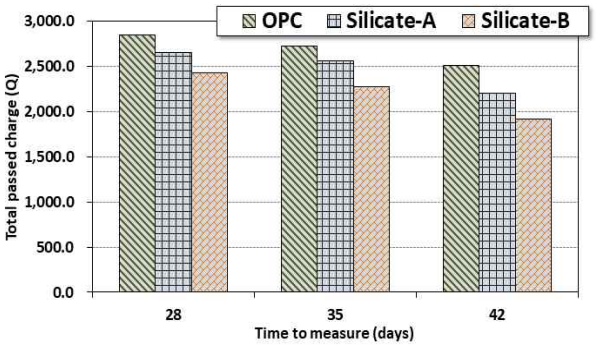
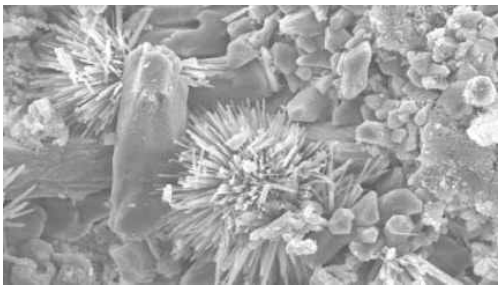
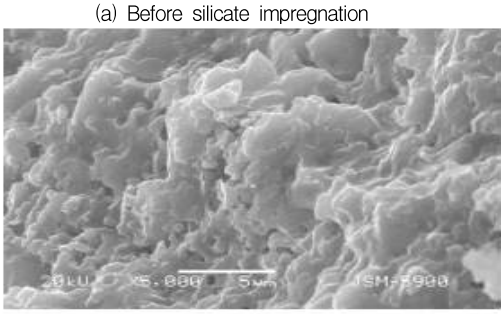


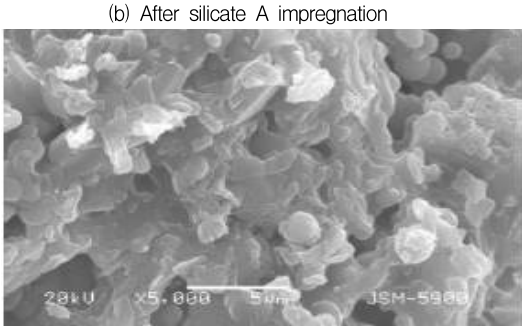
Figure 5. Passed charge variation with silicate impregnation



(a) Before silicate impregnation



(b) After silicate A impregnation



(c) After silicate B impregnation

Figure 6. Before and after SEM of silicate impregnation (5,000 Times magnification)

Figure 5에서는 OPC 및 실리케이트 종류에 따른 염화물 이온 통과성의 변화를 나타내고 있다.

Figure 5에서 알 수 있듯이 실리케이트 함침에 따라 염화물 이온의 침투가 크게 감소하였음을 알 수 있다. 28일 재령에서 42일 재령으로 증가함에 따라 통과전하량은 OPC에서 2,847에서 2,508로 감소하였으며, 실리케이트 A에서는 2,653에서 2,208로, 실리케이트 B에서는 2,434에서 1,921로 크게 감소하였다. 추가적인 2주의 양생에 따라 OPC의 경우 88.1% 수준으로 감소하였으나, A에서는 77.6%로 B에서는 67.5%로 크게 감소하였다. si-기반 함침제의 경우 주된 침투기구는 모세관을 통하여 이루어진다. 따라서 실리케이트 B가 실리케이트 A보다 비교적 점도가 낮기 때문에 콘크리트 미세 공극으로의 침투가 용이해 통과 전하량 감소 폭이 더 컸던 것으로 사료된다. Figure 6에는 두 종류의 실리케이트 함침 전/후의 SEM 사진을 나타내었다.

2) 염화물 확산계수의 변화

기존의 연구에서는 통과전하량을 이용하여 경험적으로 염화물 확산계수를 도출하였는데[18], 통과전하량과 염화물 확산성의 관계를 간접적으로 설명한다. 또한 일반적인 ASTM C 1202 시험법을 참고한 비정상상태 확산계수 평가와 매우 큰 상관성을 갖는데, 이는 포화된 콘크리트에서 30V 이상의 높은 전압이 가해지므로 통과전하량 시험과 비슷한 강전위 시험이기 때문이다[19].

식(6)에서는 통과전하량을 이용한 촉진 염화물 확산계수 도출식을 나타내었으며, 이 식은 기존의 연구에서 다수의 실험을 통해 제안된 식이다[18]. 재령의 증가에 따라 감소하는 확산계수는 Figure 7에 나타내었다.

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \quad \text{--------} \quad (6)$$

여기서 D는 촉진 염화물 확산계수(m^2/sec)를 나타낸다.

Figure 7에서는 동일한 배합을 가진 콘크리트지만 재령의 증가와 함침제의 종류에 따라 감소하는 촉진 염화물 확산계수를 나타내고 있다.

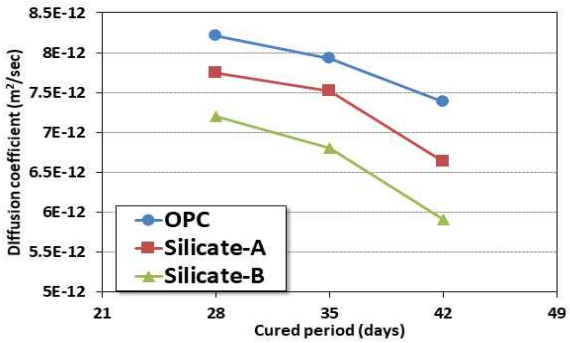


Figure 7. Accelerated diffusion coefficient of silicate impregnated concrete

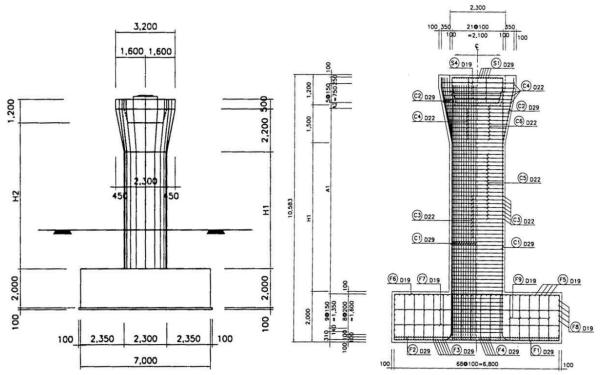


Figure 8. Target structure for chloride ingress simulation

28일 재령 OPC 확산계수 값을 기준으로 2주 경과 시 OPC는 89.9% 수준으로 감소하였으나, Silicate-A에서는 80.7% 수준으로, Silicate-B에서는 71.9% 수준으로 감소하였다. 재령이 증가할수록 수화도의 증가 및 공극률의 감소로 인해 염화물 확산성의 감소가 발생하지만 이를 고려하여도, 추가적인 10~20%의 확산계수 감소는 구체 함침제의 효과라 할 수 있다.

3.2 실리케이트 특성에 따른 콘크리트 구조의 내구수명 변화

3.2.1 대상구조물의 해석조건

본 절에서는 해안가에 노출된 RC 구조물을 대상으로 Life 365 소프트웨어를 사용하여 내구성 해석을 수행하였다. 대상 구조물은 서해 해안가에 노출된 RC 기초부 벽체로 피복두께 70mm 를 가지고 있으며, 기존의 연구를 참고하여 구조물 및 해석 조건을 설정하였다. Figure 8에서는 대상단면을 나타내고 있다[20,21].

Table 6에서는 해석조건을 나타내었는데, 해석조건은 콘크리트 시방서 기준 간만대 물보라 지역의 대표적인 조건에 노출된 기초부 현장타설 구조물이다.

Table 6. Chloride analysis conditions for service life

Cover depth	70.0mm
Surface chloride content	13.0 kg/m^3
Temperature	20 ℃ (average)
Time to build up	10.0 years
Critical chloride content	1.2 kg/m^3
m	Obtained from test results

3.2.2 확산계수 변화를 이용한 염화물 거동 평가

1) 확산기본이론 및 적용확산계수 도출

본 연구에서는 염화물 거동 해석을 위해 일반적으로 사용되는 Life 365 프로그램을 사용하였는데, 이 프로그램에서는 정상상태의 염화물 이동인 Fick's 2nd Law를 기본으로 한다. 식(7)에서는 확산지배방정식을 나타내고 있다[13,22]. Life 365는 현재 염화물 거동을 평가하는데 가장 일반적으로 사용되는 프로그램이며, 식(7)의 지배방정식은 FDM 해석을 통하여 시공간 상에서의 확산문제를 해결한다.

$$C(x,t) = C_0\left(1 - erf\frac{x}{2\sqrt{D(t)t}}\right) \quad \text{----------} \quad (7)$$

여기서, C_0는 콘크리트 표면에 있어서 염화물이온 함유량, erf는 오차함수, $D(t)$는 시간의존성 확산계수, t는 노출시간, x는 피복두께를 나타낸다.

시간의존성 확산계수 ($D(t)$)는 식(8)와 같이 제안되고 있으며, 기준확산계수 (D_{ref})는 식(9)과 같이, 시간의존성지수 (m)은 식(10)와 같이 제안되고 있다[13,22].

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad \text{----------} \quad (8)$$

$$D_{28} = 1 \times 10^{[-12.06 + 2.40\, W/CM]} \quad \text{----------} \quad (9)$$

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \leq 0.6 \quad \text{-----} \quad (10)$$

여기서, $D(t)$는 재령일 (t)의 확산계수, D_{ref}는 재령 28일의 기본확산계수, t는 재령일, t_{ref}는 28일, W/CM은 물-결합재비, FA, SG는 각각 플라이애쉬와 고로슬래그의 치환율을 나타낸다.

식(10)에서 m의 최대값은 0.6으로 가정된다. 식(8) 및 식(10)에 대해서는 많은 연구들이 수행되고 있으며, 국내에서도 합리적인 m을 선정하기 위한 실험과 연구들이 수행되고 있는데, 시간의존성 지수는 장기실험 및 실태조사 연구에 의존하므로 많은 변동성을 가지기 때문이다[13,23].

2) 확산계수의 시간의존성 평가

식(8)에서는 일반적으로 적용되는 시간의존성 확산계수 식을 나타내고 있는데, OPC 콘크리트를 사용했을 때, 시간

의존성지수(m)는 0.2 사용되고 있으며, 30 년 동안 감소 후 일정해진다고 가정한다[22]. 식(8)에서 사용된 $D(t)$는 D_{ref}는 겉보기 염화물 확산계수에 대한 식으로 내구수명에 직접적으로 사용되는 중요한 인자이다.

겉보기 확산계수를 도출하기 위해서는 장기간의 침지 또는 실태조사가 필요하므로 본 연구에서는 3.1.2절에서 도출된 통과전하량과 촉진염화물 확산계수의 상관성을 이용하도록 한다. 또한 도출된 촉진염화물 확산계수는 식(11)과 같은 상수를 고려하여 겉보기 확산계수로 변환이 가능하다. 식(11)은 기존의 연구에서 실험을 통해 겉보기 염화물 확산계수와 촉진 염화물 확산계수 간의 상관관계를 나타낸 식이며[24], 실제로 촉진염해시험을 통해 도출한 유효확산계수는 겉보기 확산계수에 비하여 약간 작은 값을 가지고 있다[24].

$$D_{rcpt} = 1.16 D_{app} + 0.32 \times 10^{-12} \ (R^2 = 0.96) \quad \text{-------} \quad (11)$$

여기서, D_{rcpt}는 촉진 염화물 확산계수(m^2/sec)를, D_{app}는 겉보기 염화물 확산계수(m^2/sec)를 나타낸다.

시간의존성지수(m)의 도출을 위해 재령의 증가에 따른 겉보기 염화물 확산계수의 감소를 식(12)과 같이 고려할 수 있으며, 이에 대한 결과는 Figure 9과 같이 나타낼 수 있다.

$$Log\left(\frac{D(t)}{D_{ref}}\right) = m \times Log\left(\frac{t_{ref}}{t}\right) \quad \text{----------} \quad (12)$$

Figure 9을 기울기에 대해 회귀분석하면 m값을 추정할 수 있는데, OPC는 0.249, A는 0.337, B는 0.458로 평가되었다. Life 365식에서 제안하는 m(0.2)는 OPC의 시간의존성을 약간 과소평가한다고 알려져 있으며[25], 함침제 A 및 B에 대해서는 모두 뛰어난 확산계수의 시간 감소성을 가지고 있다. 그 이유는 전술한대로 추가적인 수화로 인한 확산계수 감소와 증가된 CSH로 인해 자유염화물 구속이 크게 발생하기 때문이다[17].

흥미로운 것이 기울기가 OPC의 경우 선형에 가까운 값을 보이고 있는데, 함침제를 사용한 콘크리트의 경우 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 재령의 증가에 따라 추가적인 확산계수의 감소를 예상할 수 있음을 나타낸다.

3.2.3 표면함침제를 사용한 콘크리트의 내구수명

앞 절에서 도출된 겉보기 염화물 확산계수와 시간의존성

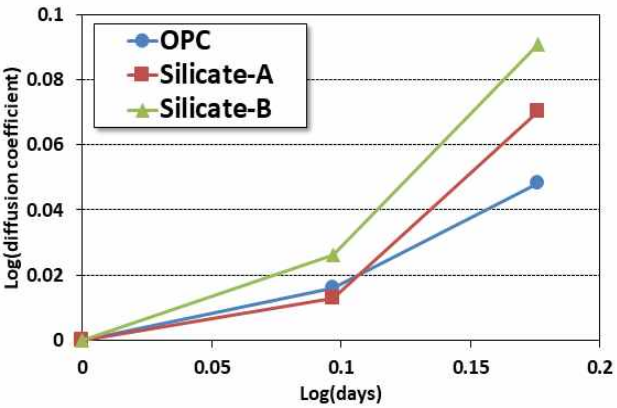


Figure 9. Relationship between log-time and log-diffusion

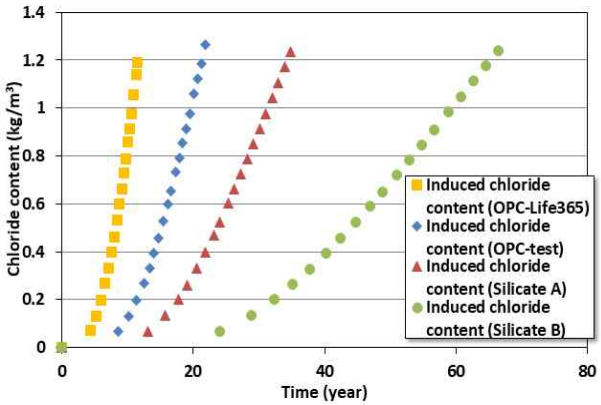


Figure 10. Chloride content variation with increasing service life

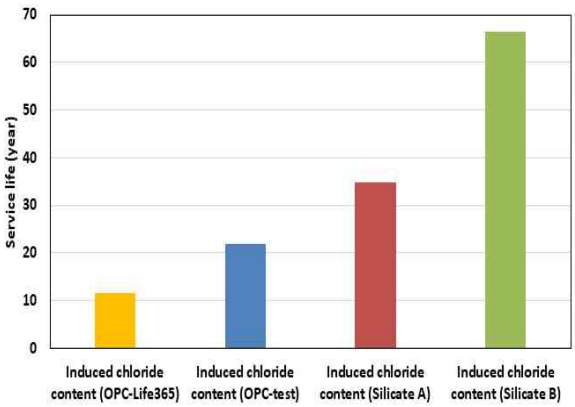


Figure 11. Evaluated service life in concrete with surface impregnation

지수를 이용하여 대상 단면의 내구수명을 평가하도록 한다. Life 365의 유한차분법을 이용하여 내구수명 해석을 수행하였는데, 시간에 따른 염화물 증가량은 Figure 10에 나타내었으며 도출된 내구수명 결과는 Figure 11에 도시하였다.

내구수명 해석결과 시간의존성지수(m)를 Life 365 기준값인 0.2를 적용한 OPC 배합에서는 11.47년, 본 연구의 실험 결과로 얻은 시간의존성지수(m)을 적용한 OPC 배합에서는 21.85년의 내구수명이 도출되었다. 실험값에 의한 내구수명이 기준 값에 의한 값보다 약 1.90배 크게 평가되었으며 이는 Life 365에서 제안하는 시간의존성지수 산정식에서는 물-결합재비의 증감을 고려하지 않아 OPC 배합의 확산특성을 과소평가하고 있기 때문으로 사료된다. OPC 배합은 단위 결합재량에 의해 염해저항성이 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다[25]. 함침제 A에서는 34.84년의 내구수명이, 함침제 B에서는 66.53년으로 비교적 높은 내구수명이 평가되었다. 실험 값에 의한 OPC 배합의 내구수명과 비교할 경우 함침제 A는 159%, 함침제 B는 304%의 내구수명 증가율을 나타내어 실리케이트 용액 함침이 콘크리트의 내구수명을 크게 증가시킬 수 있는 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 두 가지 종류의의 실리케이트 용액에 함침시킨 콘크리트의 염화물 확산 거동 및 압축강도를 평가하였다. 또한 기존의 연구결과를 참고하여 평가한 염화물 확산 거동을 활용해 각 함침제 별로 내구수명의 변화를 정량적으로 고찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 콘크리트 시편을 각 함침제에 함침 시킨 다음 재령 28일, 35일, 42일에서 압축강도를 평가한 결과, 실리케이트 함침 콘크리트가 OPC 대비 110.9%~124.2%의 강도를 나타냈다. 또한, 함침제 종류간의 강도차이는 거의 주목할 만큼 크지 않았다.
2) 촉진 염화물 확산 시험 결과에 따르면, 실리케이트 함침 여부에 따라 염화물 이온 확산 거동이 크게 변화하였다. 재령일이 28일에서 42일로 증가함에 따라 통과전하량이 OPC의 경우 88.1%로, 실리케이트-A, B는 각각 77.6%, 67.5%로 감소하였다. 함침제 침투기구는 주로 콘크리트 공극의 모세관을 통해 이루어지기 때문에 점성이 비교적 낮은 실리케이트-B에서 가장 개선된 통과전하량이 평가되었다.
3) 기존의 연구에서 제안된 OPC 배합의 시간의존성지수와 본 연구의 실험 결과로 도출한 OPC 배합의 시간의존성지수를 사용하여 내구수명을 해석하여 비교한 결과, 실험 결과로 도출한 내구수명이 기존의 제안 값에 의한 내구수명 보다 1.90배 크게 평가되었다. 기존에 알려진 OPC 배합의 시간의존성지수 산정 방식은 OPC 배합의 염화물 확산 저항 성능을 과소평가하고 있는 것으로 판단되며, 함침을 거친 콘크리트의 경우 함침제 A와 B에서 각각 34.84년과 66.53년의 높은 내구수명이 평가되었다. 실리케이트 함침을 통해 콘크리트의 염해에 대한 내구수명을 크게 증가 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

콘크리트의 주요 열화 현상 중 하나인 염해는 철근의 부식을 야기하며 이로 인해 철근콘크리트 구조물에 사용성 및 구조성에 문제가 발생한다. 콘크리트 구조물의 유지관리를 위해 표면 함침제를 콘크리트에 적용시키는 방법은 시공성 및 경제성이 우수하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 두 가지 종류의 실리케이트 용액을 사용하여 콘크리트의 표면의 공학적 특성을 개선시킨 후 압축강도와 염화물 확산저항성을 평가하였다. 또한, 기존의 연구와 본 실험결과를 기준으로 대상단면의 내구수명 해석을 실시하였다. 실리케이트 함침 후 콘크리트의 강도 및 염화물 확산 저항성은 크게 증가하였으며 내구수명은 실리케이트 A에서는 159%, 실리케이트 B에서는 304%로 크게 평가되었다.

키워드 : 콜로이달 실리카, 소듐 알루미나 실리케이트, 염화물 이온, 촉진 염화물 확산 시험, 내구수명 해석

Acknowledgement

This paper was financially supported by research fund of Hannam University(2018).

References

1. Broomfield JP. Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair. 1st ed. UK, London: Taylor & Francis; 1997. Chapter 1. p. 1-15.
2. Sarja A, Vesikari E. Durability Design of Concrete Structures. 1st ed. UK, London: Taylor & Francis; 1994. Chapter 3. p. 28-52.
3. Lee SK, Zielske J. An FHWA Special Study: Post-Tensioning

Tendon Grout Chloride Thresholds. USA: Federal Highway Administration(USA); 2014 May. 200 p. Report No.: FHWA-HRT-14-039.
4. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Standard Specification for Concrete Structures—Design JSCE Guidelines for Concrete 15. Japan, Tokyo: Japan Society of Civil Engineers (JSCE); 2007. p. 1-10.
5. European Committee for Standardization. Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures; EN-1991. Belgium: Comitée Européen de Normalization; 2000. p. 4-12.
6. American Concrete Institute(ACI) Committee-201. Guide to Durable Concrete ACI 201R-08. (Michigan)USA,: American Concrete Institute; 2008. p. 1-14.
7. Kwon SJ, Park SS, Lee SM, Kim JH. A study on durability improvement for concrete structures using surface impregnant. Journal of Korea Structure Maintenance Institute. 2007 Jul;11(4):79-88.
8. Moon HY, Shin DG, Choi DS. Evaluation of the durability of mortar and concrete applied with inorganic coating material and surface treatment system. Construction and Building Materials. 2007 Feb;21(2):362-69.
9. Park SS, Kim YY, Lee BJ, Kwon SJ. Evaluation of concrete durability performance with sodium silicate impregnants. Advances in Materials Science and Engineering. 2014 Aug;2014:1-11.
10. Emmons PH. Concrete Repair and Maintenance Illustrated: Problem Analysis, Repair Strategty, Techniques. 1st ed. USA, Wiley: RS Means Company; 1993 Oct. p. 10-29.
11. Bank LC. Composites for Construction: Structural Design with FRP Material. 1st ed. USA, New Jersey: John Wiley & Sons; 2006. Chapter 1. p. 20-8.
12. Kim HJ. A Study on the development of functional concrete using permeating agents and photocatalyst [dissertation]. [Jeonju (Korea)]: Chonbuk national university; 2010. 192 p.
13. Thomas MDA, Bamforth PB. Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag. Cement and Concrete Research. 1999 Apr;29(4):487-95.
14. Lee HS, Kwon SJ. Analysis technique on time-dependent PDF (Probability of Durability Failure) considering equivalent surface chloride content. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 2017 Mar;21(2):46-52.
15. Lee JW, Kim KM, Bae YK, Lee JS. Study on the field application according to the early strength of the concrete admixed with polycarboxylate superplasticizer. Proceeding of Korea Concrete Institute; 2004 May 21-22; Pyoengchang (Korea). Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2004. p. 200-3.
16. Yoo JG. Durability Design of Concrete and Evaluation of Field Application on Reinforced Concrete Structure Exposed to Marine Environment [Ph.D. thesis]. [Daejeon (Korea)]: Chungnam University; 2010. 25-26 p.
17. Oh HM. An assessment of concrete durability using inoragnic and organic/inorganic surface penetration agents [Master's thesis]. [Wonju (Korea)]: Sangji University; 2004. 44 p.
18. Berke NS, Hicks MC. Predicting chloride profiles in concrete. CORROSION. 1994 Mar;50(3):234-9.
19. Yoon YS, Park JS, Hwang CS, Kwon SJ. Evaluation of relationship between strength and resistance to chloride in concrete containing fly ash with ages. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 2017 Jul;21(4):53-60.
20. Jang SY, Yoon YS, Kwon SJ. Derivation of optimum GGBFS replacement with durability design parameters. Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute. 2018 Mar;6(1):36-42.
21. Lee HS, Kwon SJ. Probabilistic analysis of repairing cost considering random variables of durability design parameters for chloride attack. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection. 2018 Jan;22(1):32-9.
22. Thomas MDA, Bentz EC. Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides. Life365 Manual. USA: Silica Fume Association (SFA); 2002. p. 2-28.
23. Lee SH, Kwon SJ. Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength. Journal of the Korea Concrete Institute. 2012 Dec;24(6):715-26.
24. Polder RB, van der Wegen G, Boutz M. Performance based guideline for service life design of concrete for civil engineering structures - A proposal discussed in the Netherlands. In: Baroghel-Bouny V, Andrade C, Torrent R, Scrivener K, editors. International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability; 2007 Spain, Madrid. France: RILEM; 2007. p. 31-9.
25. Yoon YS. Evaluation of time-dependent chloride resistance in HPC(High Performance Concrete) containing fly ash [master's thesis]. [Daejeon (Korea)]: Hannam University; 2018. 79 p.