

해저 콘크리트 구조물의 신뢰성 이론에 의한 시간 의존적 내구수명 평가

Time Dependent Evaluation of Corrosion Free Life of Concrete Tunnel Structures Based on the Reliability Theory

백 승 우¹⁾ 정 민 선^{2)*}
Pack, Seung Woo Jung, Min Sun

Abstract

This study predicted the probability of corrosion initiation of reinforced concrete tunnel boxes structures using the Monte Carlo Simulation. For the inner wall and outer wall in the tunnel boxes, exposed to airborne chloride ion and seawater directly respectively, statistical values of parameters like diffusion coefficient D , surface chloride content C_s , cover depth c , and the chloride threshold level C_{lim} were examined from experiment or literature review. Their average values accounted for 3.77×10^{-12} m²/s, 3.0% by weight of cement, 94.7mm and 45.5mm for outer wall and inner wall, respectively, and 0.69% by weight of cement for D , C_s , c , and C_{lim} , respectively. With these parametric values, the distribution of chloride contents at rebar with time and the probability of corrosion initiation of the tunnel boxes, inner wall and outer wall, was examined by considering time dependency of chloride transport. From the examination, the histogram of chloride contents at rebar is closer to a gamma distribution, and the mean value increases with time, while the coefficient of variance decreases with time. It was found that the probability of corrosion initiation and the time to corrosion were dependent on the time dependency of chloride transport. Time independent model predicted time to corrosion initiation of inner wall and outer wall as 8 and 12 years, respectively, while 178 and 283 years of time to corrosion was calculated by time dependent model for inner wall and outer wall, respectively. For time independent model, the probability of corrosion at 100 years of exposure for inner wall and outer wall was ranged 59.5 and 95.5%, respectively, while time dependent model indicated 2.9 and 0.2% of the probability corrosion, respectively. Finally, impact of C_{lim} , including values specified in current codes, on the probability of corrosion initiation and corrosion free life is discussed.

Keywords : Corrosion, Diffusion, Surface chloride, Chloride threshold, Monte carlo simulation

1. 서론

콘크리트내 공극수의 고알칼리성은 철근에 부동태피막을 발생시켜 부식 발생의 위험으로부터 보호하게 된다 (Page, 1975). 그러나 해수나 제빙제의 형태로 콘크리트 표면으로부터 침투한 염소이온이 철근에 도달하게 되면, 부동태 피막을 파괴시켜 철근이 부식 환경에 놓이게 된다. 따라서, 해안환경하의 염소이온 침투해석을 통한 내구수명 예측은 공용기간 동안 구조물의 안전성을 확보한다는 점에서 매우 중요하다. Fick의 제2법칙은 확산에 의한 염소이온의 침투를 예측하는데 널리 사용되며 (Collerparidi, 1972), 일반적으로 염해 해석시 적용되는

표면염소 이온농도(C_s)와 염소이온 확산계수(D)를 시간에 대한 상수로 가정하여 왔다. 최근 들어 시멘트 수화반응과 시간에 대한 콘크리트 공극구조의 변화를 고려하여 C_s 와 D 의 시간의존성이 고려되고 있으나(Thomas and Bentz, 2000; Bamforth, 1999; Weyers et al., 1994), 이와 관련된 실험 데이터가 부족하고 콘크리트 특성과 염소이온의 침투간의 상관관계 규명은 매우 복잡하기 때문에, C_s 와 D 의 시간의존성을 고려하여 이를 계산하기에는 어려움이 있다. 또한 동일 배합으로 설계된 콘크리트 구조물조차도 시공상황, 미세환경조건 등이 다르므로 각 부재별로 콘크리트 재료특성이 달라지게 되어 염해 내구성능의 차이를 보이게 된다(Song et al., 2007).

1) 정회원, 삼성중공업 건설사업부 과장, 공학박사
2) 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정

* Corresponding author : nlovei@yonsei.ac.kr 02-2123-7857

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 이러한 염해관련 변수의 변동특성을 고려하여 보다 합리적인 내구수명 예측을 가능하게 하는 확률론적 내구성 평가모델을 제안하였으며, 염소이온 확산의 시간의존성도 고려하였다. 또한 이 모델의 적용을 위하여 실제 해저 터널 구조물을 선정하여, 염해 변수의 변동성을 실제 실험 혹은 문헌조사를 통해 구하였으며, 이를 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 도입하여 내구수명 평가를 수행하였다.

2. 확률론적 내구수명 예측

2.1 콘크리트 구조물의 내구적 한계 상태

일반적으로 염해에 의한 콘크리트 구조물의 열화과정은 진전 상태에 따라 4단계로 구분할 수 있다(건설교통부, 2005). 해수나 비래염분의 형태로 구조물 외부에 존재하는 염소이온은 콘크리트내의 모세관 공극을 통해 침투하게 되며, 철근 위치에서의 염분량이 부식임계치에 도달하게 되면(잠복기), 철근 부식이 발생하여 부식 균열이 발생하고(진전기), 점차적으로 부식속도가 증가하여(촉진기), 철근의 부피팽창으로 인하여 피복 콘크리트의 박리발생으로 인해 종국에는 구조물의 내하력이 저하된다(한계기). 잠복기가 끝나는 시점에서는 구조물에 구조적 결함이나 외관 손상은 발생하지 않으나, 철근이 부식 환경하에 놓이게 되므로 부식 발생 위험에 처하게 된다. 또한, 진전기 이후에 발생하는 부식 균열이나 피복의 박리/박락과 같은 유지관리 대책이 잠복기에서 수행할 수 있는 대책에 비해 큰 보수비용을 필요로 하므로, 구조물의 생애주기비용 관점에서도 목표내구수명동안에 대상 구조물의 열화상태가 잠복기 이전으로 유지될 수 있게 하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이러한 이유로 구조물의 내구수명 평가시에 내구적 한계상태를 콘크리트 표면에 가장 근접한 철근 주변의 염소이온농도가 부식개시 시점인 임계 염소이온농도(C_{lim})에 도달하였을 때로 설정하였다.

2.2 신뢰성 내구수명 해석

본 연구에서는 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구수명 예측을 위하여 신뢰성 이론에 기반한 내구성 평가모델을 도입하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용하여 염소이온 침투해석에 관련된 각 입력변수에 대해 표본을

추출하고, 각 표본에 대해 환경하중과 내구성능으로 표현되는 한계상태함수를 평가하게 된다.

$$g(t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

여기서, $g(t)$ 는 한계상태함수, $R(t)$ 는 내구성능, $S(t)$ 는 환경하중을 나타낸다. 염소이온 침투해석에서는 환경하중이 철근위치에서의 염소이온 농도를 나타내고, 내구성능은 부식임계 염소이온농도를 나타낸다. 전체 표본에 대한 한계상태함수 평가의 결과를 이용하여 다음의 식(2)를 통해 시간 t 에서 구조물이 내구적 한계상태에 도달할 확률을 계산한다.

$$P_t = \frac{n(g(t) < 0)}{N} = \frac{n(C_{lim} - C_d(t) < 0)}{N} \quad (2)$$

여기서, $C_d(t)$ 는 시간 t 에서의 염소이온농도, P_t 는 시간 t 에서 내구적 한계상태에 도달할 확률, 즉 부식개시 확률을 나타내며, N 은 전체표본개수, $n(g(t) < 0)$ 은 $g(t) < 0$ 을 만족하는 개수를 의미한다.

또한 부식개시 확률은 정규분포함수를 이용하여 신뢰성지수(β)로 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_t = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad (3)$$

$(-\infty < u < \beta)$

여기서, Φ 는 표준정규분포함수를 나타낸다.

본 연구에서 콘크리트 구조물의 염해 내구수명은 사용개시 후 내구적 파괴확률이 10%에 도달하였을 때로 정의하였으며(CEB-FIP, 2006), 이는 신뢰성 지수 1.3에 해당하는 값을 의미한다.

2.3 대상 구조물의 개요

본 연구에서 제안한 염소이온 침투의 시간의존성을 고려한 확률론적 내구수명 평가기법을 적용하기 위하여 선정된 대상 구조물은 내륙과 섬을 연결하는 해저 터널 구조물로서, 다수의 프리캐스트 콘크리트 터널 부재가 해저에 침지되어 하나의 터널을 이루게 된다. 대상 구조물의 지배 열화인자는 염분침투에 의한 철근부식이며, 그 사회적/경제적 중요도에 의해 염해에 대한 목표내구수명 100

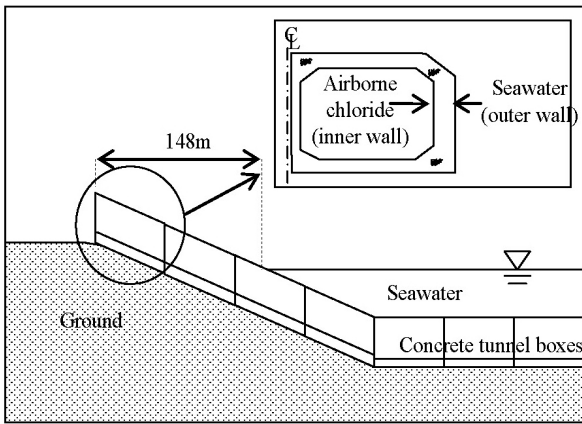


Fig. 1 Overview of the tunnel box structures

Table 1 Oxide composition of binders

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Mn ₂ O ₃	TiO ₃	SO ₃	LOI
OPC	62.1	21.5	4.8	3.2	1.3	0.31	0.65	-	-	3.6	1.3
PFA	1.4	50.4	17.9	7.2	1.2	0.3	2.3	-	0.75	0.64	14.9
GGBS	43.7	32.9	10.5	1.28	8.55	0.25	0.27	0.3	0.51	-	1.35
SF	0.28	92.9	0.31	0.06	0.02	0.19	0.73	-	-	0.17	4.7

년을 보유하도록 설계되었다. 대상 구조물의 염해 환경조건은 크게 두가지로 구분할 수 있는데, 직접 해수에 접촉하여 해수로부터 염소이온이 침투하는 터널 외벽구간과 대기중 비래염분이 콘크리트 표면에 누적되어 내부로 침투하는 터널 내벽구간으로 나눌 수 있으며(Fig. 1), 구조물의 특성상 비말대구간은 존재하지 않는다. 비래염분이 염소이온의 주 공급처가 되는 해안가로부터 가장 근접한 터널내벽은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 약 148m 떨어져 있다. 또한 대상 구조물에 사용된 재료는 터널 내/외벽 모두 보통 포트랜드 시멘트(OPC), 고로슬래그 미분말(GGBS), 플라이애쉬(PFA), 실리카폼(SF)이 포함된 4성분계 콘크리트이며, 화학조성비는 Table 1과 같다. 대상 구조물에 단위시멘트량 175kg/m³, GGBS 144kg/m³, PFA 83kg/m³, SF 12kg/m³의 결합제가 사용되었다.

3. 염소이온 침투 해석

3.1 염소이온 확산 방정식

Fick의 제2법칙은 콘크리트내의 염소이온 확산 거동을 평가하는데 있어서 널리 사용되고 있으며(Bamforth, 1999; Thomas, 1991; Gjorv, 2002), 콘크리트 표준시방서 내 구성편(2004)에서도 이 모델의 간략해를 채택하여 내구

성 설계 및 평가에 적용하고 있다. 하지만 기존의 염소이온 확산모델은 C_s 와 D 를 상수로 가정하였으므로, 실제 환경을 제대로 반영할 수 없는 한계가 있다(Song et al., 2006). 따라서, 고체상의 열전도 방정식을 농도 구배로 인한 이온의 확산에 적용하여 시간에 따라 변화하는 $C_s(t)$ 를 초기조건으로 하여, Fick의 제2법칙의 정밀해를 본 내구성 해석 모델에 적용하도록 한다(Pack et al., 2008).

$$C(x,t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} C_s \left(t - \frac{x^2}{4Dw^2} \cdot e^{-w^2} \right) dw \quad (4)$$

여기서, $C(x,t)$ 는 시간 t , 위치 x 에서의 염소이온농도, C_s 는 표면염소이온농도, D 는 염소이온 확산계수이다.

3.2 시간의존성 해석

염소이온 침투해석시 중요한 인자는 D 와 C_s 로 구분할 수 있다. 콘크리트 내의 공극구조가 치밀해짐에 따라 염소이온 확산계수는 시간에 대해 감소하게 되며, 그와 반대로 표면 염소이온농도는 시간에 따라 증가하게 된다. 그러나 C_s 의 시간의존성은 기존의 염소이온침투모델에서 계산의 불편함, 시간에 대해 정밀한 C_s 값 산정의 어려움 등으로 일반적으로 무시해 왔으며, 시간에 대해 일정한 C_s 가 널리 사용되어 왔다. 그러나 이러한 C_s 값에 비해 좀더 현실적인 시간의존성을 고려한 C_s 모델이 여러 연구자들에 의해 제안되었으며, Song et al.(2006)은 기존의 장기 실험 자료를 바탕으로 기존의 C_s 모델에 비해 보다 현실적으로 C_s 를 평가할 수 있는 모델을 식 (5)와 같이 제안하였다. 본 연구에서는 다음의 로그함수를 이용한 C_s 모델을 사용하도록 한다.

$$C_s(t) = \alpha [\ln(\beta t + 1)] \quad (5)$$

여기서, α 와 β 는 상수, t 는 노출기간(년)

시멘트의 수화반응은 시간에 따라 콘크리트 공극구조의 개선, 즉 공극의 연계성을 감소시키기 때문에 콘크리트의 염소이온 확산계수는 시간에 대해 감소하게 된다. 또한 시멘트내의 수화생성물인 C_3A 는 프리텔염을 형성하거나 염소이온과 반응하며, 콘크리트내의 염소이온 확산을 지연시킨다. 또한 콘크리트 확산계수의 감소는 결합제

와 결합재량 및 물-결합재비에 의존한다고 알려져 있다 (Thomas and Bentz, 2000). 본 연구에서는 확산계수의 이러한 시간의존성을 고려하기 위하여 식 (6)의 확산계수 예측식을 적용하였다(한국콘크리트학회, 2004).

$$D_m(t) = \frac{D_R}{1-m} \left(\frac{t_R}{t}\right)^m \quad (t < t_{lim} = 30years) \quad (6a)$$

$$D_m(t) = \frac{D_R}{1-m} \left[(1-m) + m \frac{t_{lim}}{t} \right] \left(\frac{t_R}{t_{lim}}\right)^m \quad (t \geq t_{lim} = 30years) \quad (6b)$$

여기서, D_R 은 기준시간 t_R (=28일)에서의 확산계수이며 m 은 재령계수, t_{lim} 은 감소한계(=30년)를 의미한다. 본 연구에서 재령계수 m 은 기존 문헌을 참고하여 적용하였다(Thomas and Bentz, 2000)

3.3 관련 변수의 조사

본 연구에서는 확률 변수의 최적 분포를 결정하기 위하여 Chi-square test, Cramer von Mises test, Kolmogorov-Smirnov test, PPCC test의 4자리 검정방법을 이용하여 Goodness-of-fit test를 수행하여 통과하는 분포를 선정하여 편차가 최소가 되는 분포를 최적 분포로 결정하였다.

염소이온 침투해석시 재료특성치 지표로서 D 를 구하기 위하여 동일배합에 대해 총 78회 확산계수 측정실험이 수행되었으며, 시편제작 후 28일간 수중양생을 실시한 시편을 대상으로 하였다. 실험방법은 비정상상태 전기촉진 시험법인 NT BUILD 492(1999)의 기준에 따라 수행되었다. 측정결과와 통계적 분석을 위하여 Fig. 2와 같이 히

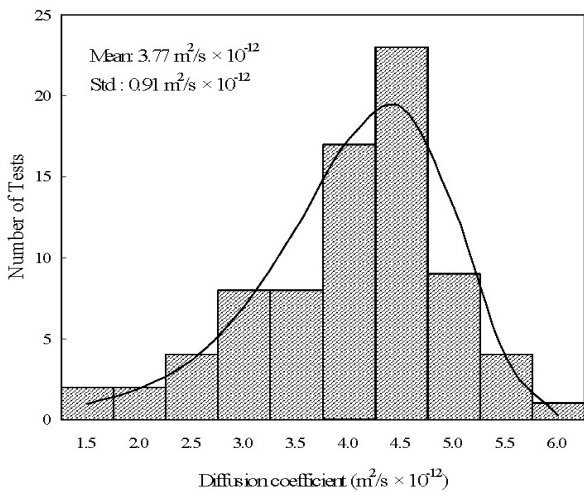


Fig. 2 Distribution of the diffusion coefficient obtained from experiments

스토그램으로 나타내었다. 실험 결과, 확산계수의 평균치가 $3.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 표준편차는 $0.91 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나왔으며, Weibull분포를 따르고 있음을 알 수 있었다. 또한 대부분의 확산계수값은 $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서 $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 범위내에 있었으며, $6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 을 초과하는 값은 없었다.

대상 구조물의 피복두께를 측정하기 위하여 비파괴시험법 중에서 전자파 레이더법을 이용한 RC-Radar를 사용하였다. 미리 제작된 총 5개의 프리캐스트 터널 박스 구조물에 대해 총 109지점(터널 내벽: 65지점, 터널 외벽: 44지점)에서 측정되었다. 터널 내벽과 외벽에 대한 피복두께 측정 결과를 히스토그램으로 Fig. 3에 나타내었다. 터널 내벽의 피복두께 평균은 45.5mm, 표준편차는 5.8mm이며, 35mm에서 55mm범위사이에 존재하고 있다. 터널 외벽에 대한 피복두께 측정값의 평균은 94.7mm,

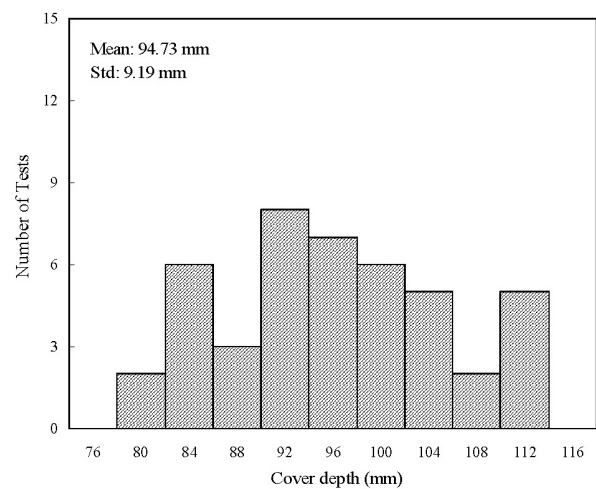
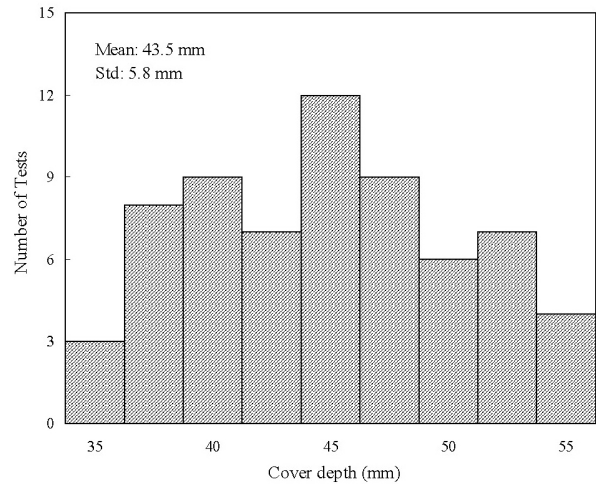


Fig. 3 Distribution of the concrete cover depth measured from the tunnel boxes obtained from experiments

표준편차는 9.19mm로 나타났으며, 터널 내/외벽에서 측정된 피복두께값이 모두 정규분포를 따르고 있음을 알 수 있었다. 콘크리트 터널 구조물의 터널 내벽과 외벽에 대한 설계값은 45mm, 80mm로서 측정결과의 평균치는 설계치를 모두 만족하는 결과를 보여주었다. 특히 터널 외벽의 피복측정값은 설계치인 80mm보다 대부분 큰 값을 보임을 알 수 있다.

염해를 받는 콘크리트내 철근의 부식 개시 시점을 의미하는 C_{lim} 는 본 연구에서 별도로 실험을 수행하여 구하지 않았으며, 기존 문헌을 조사하여 통계 분석을 수행하였다.

또한 부식 임계치는 $[Cl^-]:[OH^-]$, 자유염화물량, 전염화물량, 콘크리트 단위중량당 %, 시멘트 단위중량당 % 등과 같이 여러 단위로서 표현할 수 있지만, 결합재의 부

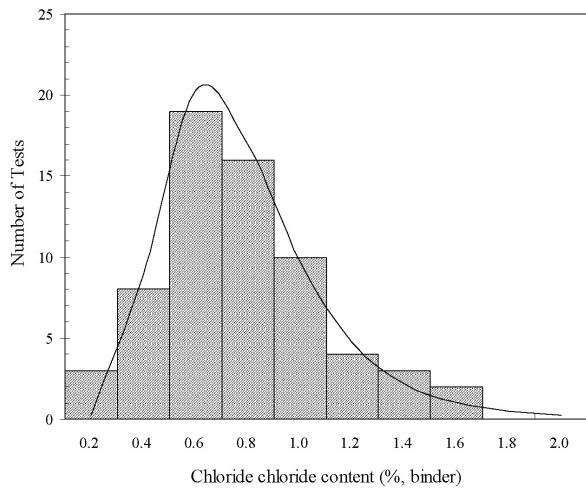


Fig. 4 Distribution of the chloride threshold level obtained from a literature review

Table 2 Stochastic parameters used to evaluate the service life

Variables	Units	Inner wall	Outer wall	Reference
C_S	(C_S type)	$C_S(t) = \alpha [\ln(\beta t + 1)]$	$C_S = const.$	Song et al. 2007
	% of binder	$\alpha = N(0.16, 0.05)^*$ $\beta = N(3.77, 0.38)$	$N(3.00, 0.90)$	Duracrete 2000
c	mm	$N(45.50, 5.77)$	$N(94.70, 9.19)$	experiment
D	$m^2/s \times 10^{-12}$	$N(3.77, 0.92)$	$W(3.77, 0.92)^{***}$	experiment
m	dimensionless	$N(0.56, 0.11)$	$N(0.56, 0.11)$	Thomas and Bentz 2000
C_{lim}	% of binder	$LN(0.69, 0.30)^{**}$	$LN(0.69, 0.30)$	Published data

* N(Mean, Standard deviation) means normal distribution

** LN(Mean, Standard deviation) means log-normal distribution

*** W(Mean, Standard deviation) means Weibull distribution

식 저항성을 내포하고 있는 단위 결합재당 전염화물량의 중량비(%)로써 나타내도록 한다(Ann and Song, 2007).

문헌으로부터 조사한 임계 염소이온농도의 히스토그램을 Fig. 4에 나타내었다(Song et al., 2009). Fig. 4로부터, C_{lim} 는 단위결합재량 대비 0.2에서 1.6%의 범위에 있었으며, 평균값은 0.69%, 표준편차는 0.3%이고 대수정규분포를 따르고 있음을 알 수 있었다. 현재 국내외 여러 기준(건설교통부, 2004; BS 8110, 1985; ACI 222, 1994)에서 부식 임계치를 결합재 단위중량당 0.2%에서 0.4%로 제안하고 있는 것에 비해, 본 연구에서 조사한 임계치는 약 2배이상 큰 수치를 보이고 있음을 알 수 있다.

대상 구조물의 염소이온 침투 해석 구간은 크게 터널 내벽과 외벽으로 나눌 수 있다. 항상 해수중에 침지되어 있는 터널 외벽과 달리 터널 내벽의 경우 Fig. 1에서 알 수 있듯이 해안가로부터 일정거리 떨어져 있으므로 해수에 직접 접촉하지 않고 대기중 비래염분배에 의해 염소이온 침투가 발생하게 된다. 이러한 경우 표면염소이온농도는 시간에 따라 증가하게 되므로(Mustafa and Yusof, 1994), 표면염소이온농도의 시간의존성을 고려한 식 (5)의 모델에 Song et al.(2007)이 제안한 거리에 따른 표면염소이온농도 상수값을 해안으로부터 거리를 고려하여 적용하도록 한다. 또한 터널 외벽의 경우 상시 해수중에 침지되어 있으므로, 기존 문헌에서의 제안값을 적용하여 결합재 단위중량당 3.0%를 적용하도록 한다(Duracrete, 2000). 이상으로부터 구한 염해 관련 변수의 각 결과값을 터널 외벽과 터널 내벽으로 구분하여 Table 2에 나타내었다.

4. 해석 결과

4.1 염소이온 침투 해석

Fig. 5에 터널 내벽의 여러 노출기간(5년, 50년, 100년)에서 깊이에 따른 염소이온 침투 이력을 나타내었다. C_S 값은 시간의존성을 고려하는 경우 Table 2의 값을 적용하였으며, 시간의존성을 고려하지 않은 경우에는 0.95%를 적용하였는데, 이는 노출 100년에 해당하는 C_S 값이며, 기존의 설계기준에서는 C_S 값이 실제 환경에 100년 노출된 값에 비해 안전측의 값을 제시하였으므로(Kawamura et al., 2005) 이를 반영하여 노출 100년의 C_S 값을 사용하였다. Fig. 5로부터, 염소이온 침투의 시간의존성을 고려한 경우에는 터널 내벽의 철근 위치에서 침투 염소이온

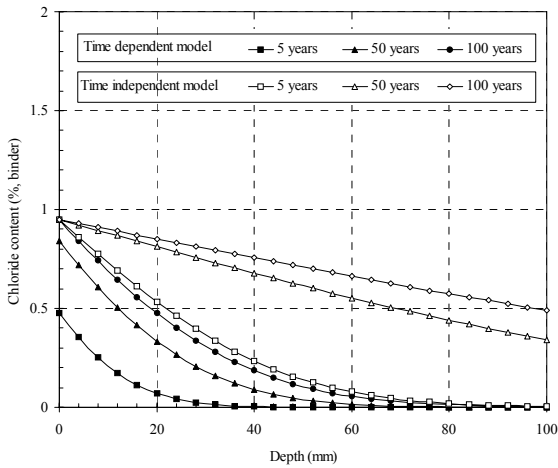


Fig. 5 Chloride profiles of inner wall in concrete tunnel boxes with time depending on time dependency of chloride transport

농도가 5년, 50년, 100년 재령에 따라 각각 0.001, 0.057, 0.137%로 나타난 반면, 시간의존성을 고려하지 않은 경우 0.18, 0.64, 0.74%가 됨을 알 수 있었다. 이는 시간의존성을 고려하지 않게 되면 대상 구조물의 터널 내벽에서는 비래 염분의 침투로 인하여 사용기간 50년에 도달하기도 전에 내부 철근이 부식개시 상태에 놓이게 됨을 의미한다. 이러한 해석 결과는 크게 두가지 요인, 즉 D 의 시간에 대한 감소와 C_s 의 시간에 대한 증가를 고려하지 않아서 발생하게 된 것으로서, 염소이온 침투의 시간 의존성을 고려하지 않는 해석 모델은 철근 부식 위험성을 C_s 가 사용개시후 식 (5)의 대수함수 형태로 증가하게 되는데, Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 구조물의 사용 개시후 5년에서의 C_s 가 결합재 단위중량당 0.48%인데 반하여, 100년에서는 0.95%로 증가함을 알 수 있다. 재령 100년에서 C_s 가 두가지 모델에 대해 전부 결합재 단위중량당 0.95%로 동일한 값을 보이게 되지만, 염소이온 침투이력에서는 큰 차이가 발생한 것을 알 수 있다. 이는 앞서 제시한 식 (4)의 염소이온 침투해석식이 C_s 의 100년간의 시간이력을 고려할 수 있는 식임에 반하여, 기존 콘크리트 표준시방서 (2004)에서의 해석식은 C_s 를 상수로 한정하였기 때문이다.

Fig. 6은 터널 외벽의 사용기간별 깊이에 대한 염소이온 침투 이력을 보여준다. 터널 외벽의 해석 결과에서도 역시 시간의존성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 큰 차이가 발생한 것을 알 수 있다. 시간의존성을 고려하지 않았을 때, 터널 외벽의 철근 위치에서 염분량은 5

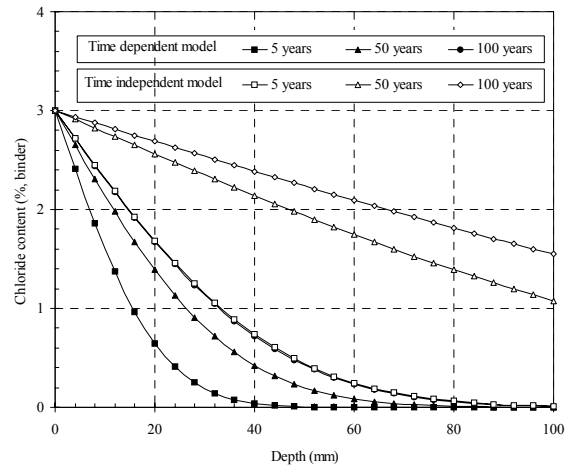


Fig. 6 Chloride profiles of outer wall in concrete tunnel boxes with time depending on time dependency of chloride transport

년, 50년, 100년에 대해 결합재 단위중량당 0.02, 1.16, 1.62%를 보이고 있지만, 시간의존적 모델에서는 피복두께에서 염분량이 거의 0에 수렴하고 있다. 또한 터널 내벽과는 달리 터널 외벽에서는 시간의존적 모델의 예측결과에서 표면염소이온농도의 시간에 따른 증가현상을 볼 수 없다. 이는 터널 외벽은 직접적으로 해수와 맞닿아 있는 구간으로서 항상 해수와 접촉하고 있기 때문에 해상 대기구간의 콘크리트 구조물과는 달리 표면염소이온농도가 시간에 따라 일정한 값을 보이기 때문이다. 그럼에도 불구하고 시간의존적 해석 모델에서의 염소이온 농도가 훨씬 작은 값을 보이는 이유는 염소이온 확산계수의 시간 의존성 때문이다. 특히 시멘트를 제외한 여러 결합재 (GGBS, PFA, SF)가 혼입된 콘크리트의 경우 확산계수의 시간에 따른 감소량은 더욱 커지게 되는데(Bamforth, 1999), 대상 구조물에 사용된 콘크리트의 경우 위의 3가지 결합재가 모두 포함된 4성분계 콘크리트로서 염소이온 침투 해석시에 확산계수의 시간에 대한 감소 영향은 해석시 필히 고려되어야 한다.

Fig. 7은 콘크리트 터널 내벽과 외벽의 철근위치에서 시간에 따른 염소이온농도의 변화를 나타낸 것이다. 대상 구조물의 설계내구수명인 100년에 도달하였을 때 철근위치에서의 염소이온농도는 시간의존성을 고려하지 않은 경우에 터널 내벽과 외벽에 대해 결합재 단위중량당 0.74, 1.62%이며, 시간의존적 모델을 사용하였을 때에는 0.14, 0.02%가 됨을 알 수 있다. 터널 내벽과 외벽에 대해 시간의존성의 영향, 즉 철근위치에서 염소이온 침투 농도 차

이가 다른 이유는, 두 해석 구간에서의 피복두께가 약 2배정도의 차이가 나기 때문이며, 확산계수의 시간에 대한 감소 영향이 피복두께가 증가할수록 침투 염분량을 더욱

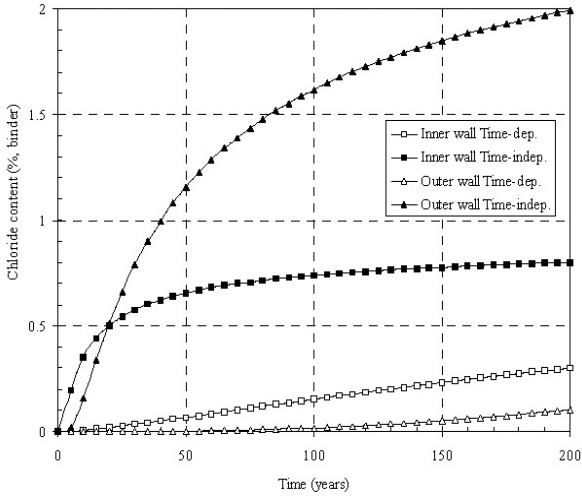


Fig. 7 Penetration of chloride ions at cover depth of concrete tunnel boxes with time depending on the time dependency of chloride transport

감소시키기 때문이다. 또한 터널 내벽과 외벽에 대해 철근위치에서의 염소이온농도가 임계치에 도달하는 기간이 시간의존성을 고려하지 않은 경우 각각 65년, 26년인데 비해 시간의존적 모델에서는 모두 200년 이상의 내구수명을 보유하고 있음을 알 수 있다. 따라서 시간의존성을 고려하지 않은 모델로는 100년 내구수명을 보유하도록 설계된 대상 구조물이 모두 설계내구수명을 만족하지 않으며, 시간의존성 모델에 비해 구조물의 염해 내구성능을 과소평가하고 있음을 알 수 있다.

4.2 염소이온 분포

신뢰성 이론에 근거한 염소이온 침투 해석을 위하여, Table 2의 입력변수자료를 근거로 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 염해 관련 변수의 표본을 추출하였다. 이를 통해 식 (4)를 계산하였으며, 터널 외벽의 염소이온농도의 분포를 조사하기 위하여 Fig. 8에 50년에서 200년

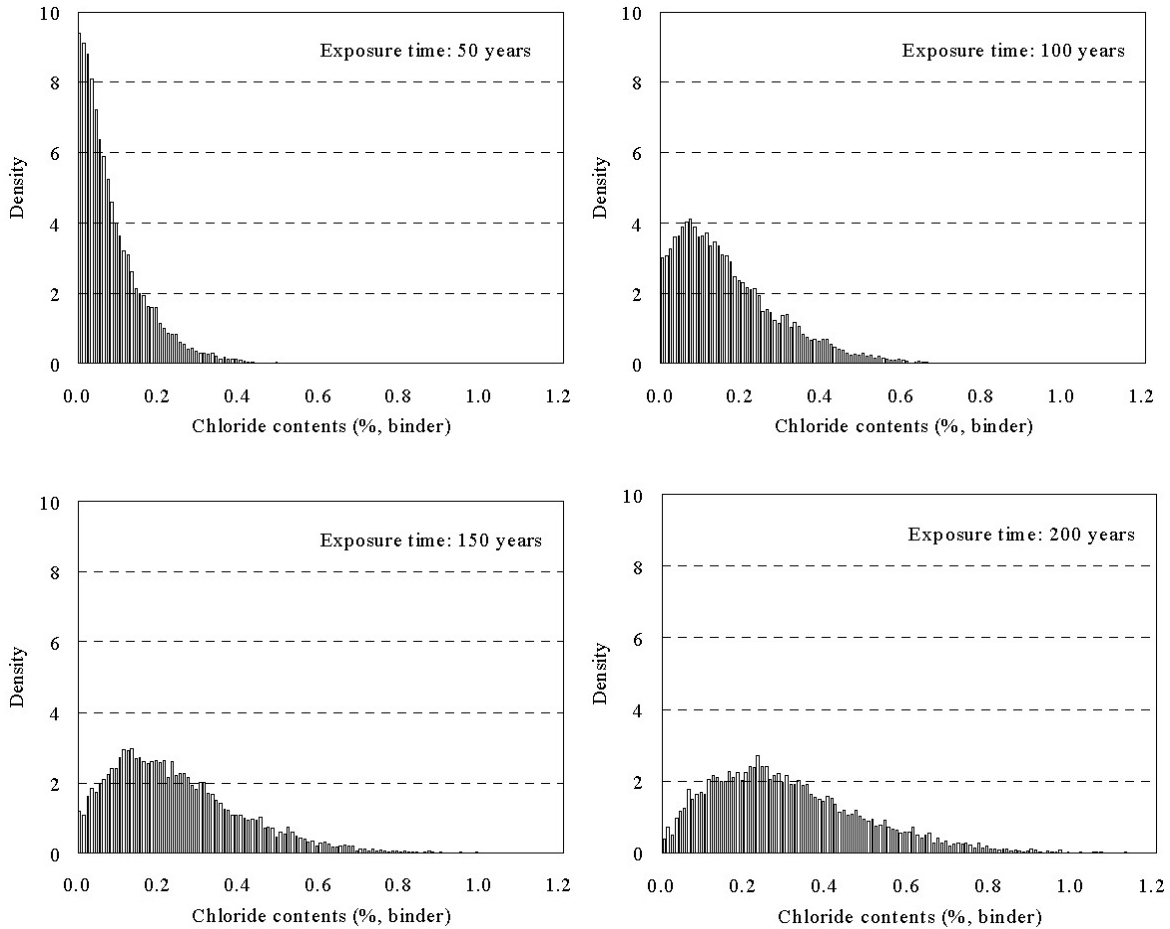


Fig. 8 Histograms of chloride content at rebar for outer wall of the tunnel boxes

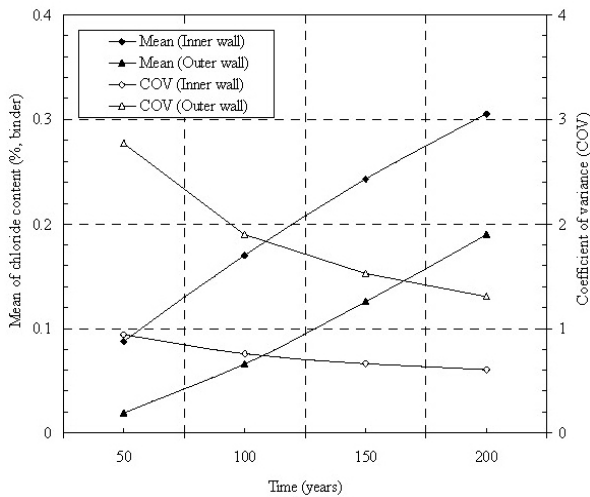


Fig. 9 Mean and coefficient of variance of chloride content at rebar for inner wall and outer wall in concrete tunnel boxes with time

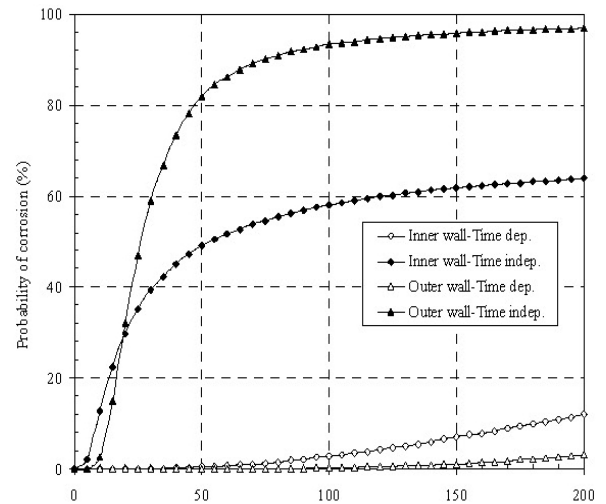


Fig. 11 Probability of the corrosion initiation for the concrete tunnel boxes depending on the time dependency of chloride transport

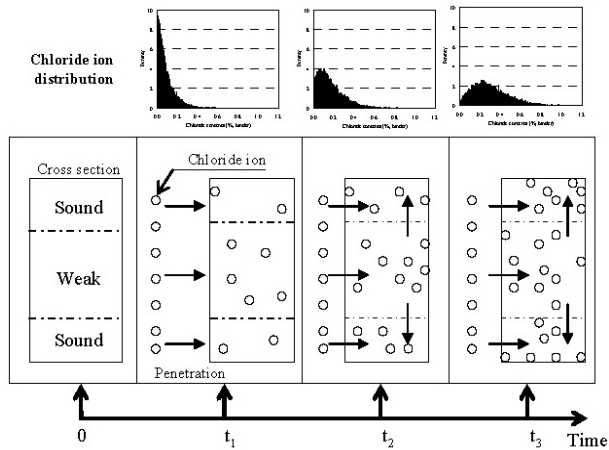


Fig. 10 A change of chloride ion distribution in a section with time

까지 철근위치에서 침투 염소이온농도 분포를 히스토그램으로 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 50년, 100년, 150년 200년에서 철근위치의 염소이온 농도의 평균은 각각 결합재 단위중량당 0.02, 0.08, 0.15, 0.22%로 시간에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 변동 계수는 각각 2.77, 1.90, 1.53, 1.31로 시간에 대해 감소하는 경향을 보였다. 또한 침투 염소이온 농도의 분포 형상은 모든 재령에 대하여 모두 감마분포를 따르고 있음을 Fig. 8을 통하여 알 수 있다.

Fig. 9에 터널 내벽과 외벽에서의 시간에 따른 염소이온농도의 평균, 표준편차, 변동계수를 정리하여 나타내었다. 그림으로부터 터널 내벽과 외벽 모두에 대하여 평균이 시간에 따라 증가하는 반면, 분포의 변동성을 나타내

는 변동계수는 시간에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에 콘크리트 단면에서의 시간에 따른 염소이온의 확산 형상을 나타내었다. 콘크리트는 비균질성 재료이므로 염소이온 침투에 있어서 치밀하지 못한 취약부의 확산이 건전부의 확산속도에 비해 빠르게 될 것이다. 따라서 초기에는 취약부의 농도가 건전부에 비해 확연히 높게 나오므로 한단면에서의 변동폭이 크게 되지만, 시간이 갈수록 취약부에서 염소이온의 높은 농도로 인하여 침투 방향으로의 확산이 아닌 농도 평형을 맞추기 위한 횡방향의 확산이 일어나게 되므로 한 단면에서의 농도 분포의 변동성이 줄어들게 된다. 하지만 콘크리트 표면으로부터 염소이온의 공급은 지속적으로 이루어지므로 그 평균값은 증가하고, 시간이 갈수록 농도분포의 변동폭은 줄어들게 되는 것이다.

4.3 확률론적 내구수명 해석

대상 부재의 시간에 대한 부식 개시확률 예측을 위하여 식 (3)의 부식 확률 예측식을 통해 내구수명을 평가하였다. 대상 구조물의 각 부재에 대해 시간의존성에 따른 부식 개시 확률을 Fig. 11에 나타내었으며, 시간에 대한 신뢰성 지수의 변화를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11로부터 구조물의 목표내구수명(100년)에서의 터널 내벽과 외벽에 대해 시간의존성을 고려하지 않은 경우의 부식 개시 확률은 각각 59.5, 95.5%이었으며, 시간의존성 모델을 적용한 경우는 2.9, 0.2%이었다. 또한 신뢰성 지수는 시

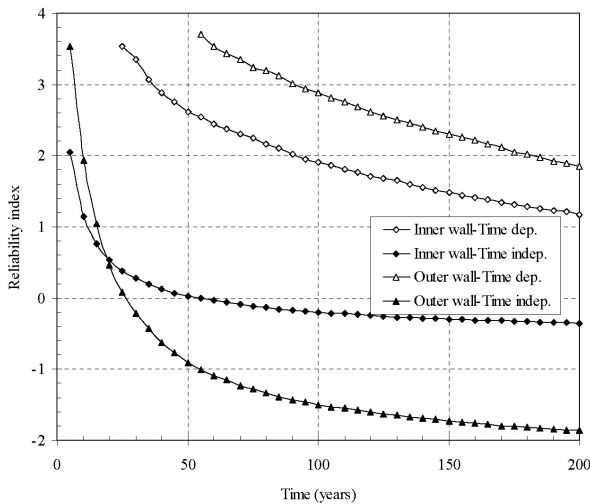


Fig. 12 Reliability index for the concrete tunnel boxes depending on the time dependency of chloride transport

간의존성이 적용되지 않은 경우 -0.2 , -1.5 이고, 시간의존적 모델에서는 1.9 , 2.8 로 계산되었다. 또한 대상 구조물의 내구수명을 부식 개시 확률을 10% (신뢰성 지수 1.3)으로 정의하였을 때, 구조물의 염해 내구수명은 시간의존성을 고려하지 않은 경우 터널 내벽과 외벽에 대해 각각 8 , 12 년이며, 시간의존성 모델에서는 178 , 283 년으로 나타났다. 염소이온 침투의 시간의존성을 고려하지 않았을 때 대상 구조물은 설계내구수명인 100 년을 만족시키지 못하였으며, 시간의존성 모델의 결과와 비교하였을 때 터널 구조물의 각 부재에 대해 그 내구성능을 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있다.

5. 토의

5.1 염해 관련 변수의 변동성

본 연구에서는 염해 관련 변수(C_s , D , C_{lim})에 대한 각각의 변동성을 고려하여 몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 확률론적 내구수명 해석을 수행하였다. D 는 염해 내구성 해석시 콘크리트의 재료적 특성을 반영하는 중요한 지표로서, 일반적으로 물-결합재비, 단위결합재량, 결합재 종류 등에 따라 결정된다(Bamforth and Price, 1993). 본 연구에서는 총 78 회 수행한 확산계수 실험결과로부터 변동특성을 구하였는데, 동일한 배합과 동일 재료를 사용하였음에도 Fig. 2와 같이 약 24% 의 변동계수를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 확산계수의 변동성이 시멘트

구조체의 비균질성과 잔골재 및 굵은 골재의 분포 형상에 따라 변하게 되므로(Tikaltsky et al., 2005), 동일 배합이라고 할지라도 다양한 확산계수값의 분포가 형성이 될 수 있기 때문이다.

대상 구조물의 터널 내벽과 외벽은 각각 피복두께 45mm , 80mm 로 설계되었다. 피복두께의 조사를 위해서 터널 외벽과 내벽에 대해 실측조사를 한 결과 본 연구의 내구수명 예측을 위해 적용된 피복두께가 각각 45.5mm , 94.7mm 로 얻어졌다. 따라서 대상 부재 모두 설계피복두께를 확보하고 있음을 알 수 있다. 터널 외벽의 경우 실제 구조물의 피복두께 평균치가 설계치에 비해 약 15mm 정도 크게 시공되어 구조물의 염해 내구성을 충분히 보장한다는 장점이 있으나, 본 연구에서의 해석 기법을 적용하였을 때 평균치 80mm 의 피복두께를 적용하여도 198 년의 내구수명이 예측되어 충분한 설계내구성능 이상을 보장할 수 있다. 피복두께의 증가는 콘크리트 구조물의 부식 저항성 확보란 측면에선 긍정적인 역할을 하지만, 피복 콘크리트가 증가하면 시공후 표면균열이 발생하기 쉽고, 구조물 자체의 사하중을 증가시키며, 재료 비용이 증가한다는 측면에서 부정적인 면도 존재하므로 이에 대해 고려하여야 한다. 또한 대상 구조물의 피복두께 조사를 통한 터널 내벽과 외벽의 변동계수는 각각 0.12 와 0.10 임을 알 수 있었다. 피복두께의 변동성은 현장의 시공여건을 반영하는 인자로서 구조물의 염해 내구수명에도 큰 영향을 미치게 되는데, Song et al. (2007)은 피복두께의 변동계수가 4 배 증가함에 따라 내구수명이 120 년 이상 감소함을 보여주었다. 따라서 현장 시공 여건을 개선하는 것만으로도 해안가 구조물의 내구성 확보에 큰 역할을 한다고 볼 수 있다.

5.2 부식임계치의 영향

철근의 부식 개시 시점을 의미하는 C_{lim} 는 본 연구에서 문헌 조사를 통해 구하였다. 부식 임계치는 단위결합재당 중량비로 0.2% 에서 1.6% 의 범위에 존재하였다. 부식 임계치의 영향 인자로는 배합이나 환경적인 요인을 포함하여, 고정화능력, 시멘트 구조체의 pH저하 저항성, 철근과 콘크리트 경계면의 상태 등으로 나눌 수 있으며, 이러한 여러 요인이 복합적으로 작용하여 결정된다(Song et al., 2010; ACI, 1994). 하지만 현재까지 여러 관련 기준이나 규격에서는 이러한 다양한 영향 인자를 고려하지 않

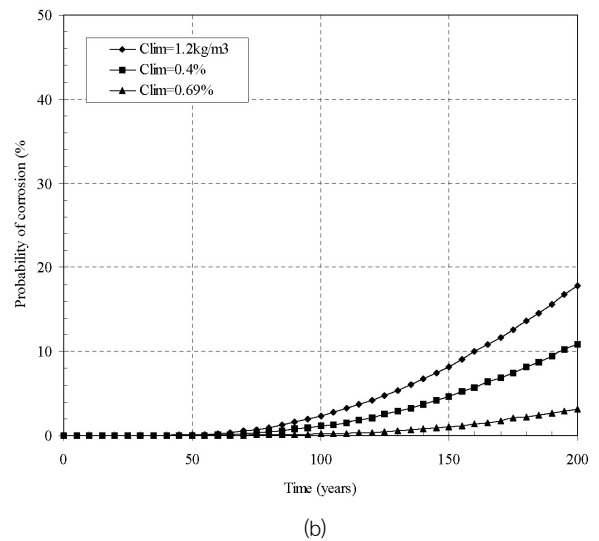
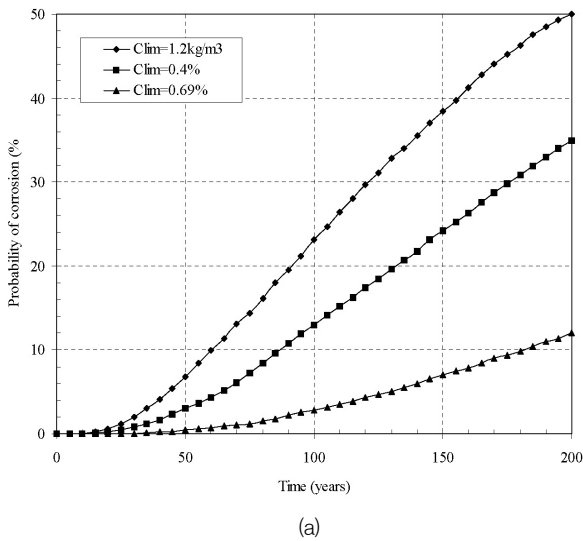


Fig. 13 Probability of corrosion initiation using the different chloride threshold level for (a) inner wall and (b) outer wall

고, 염해 내구성 평가를 수행할 때 보수적인 부식 임계치의 적용을 제안하고 있다(MOCT, 2004; BS 8110, 1985; 日本土木學會, 2002). 영국 BS 8110 (1985)에서는 시멘트 단위 중량당 0.4%, 한국이나 일본에서는 단위 콘크리트 중량대비 1.2kg/m³ (단위결합재량 414kg/m³인 경우 결합재 중량대비 0.29%)을 제안하고 있으나, 실제 본 연구에서의 문헌조사결과 평균값이 결합재 중량대비 0.69%에 도달하고 있어 콘크리트 관련 규격의 값이 구조물의 내구성능을 과소평가할 우려가 있다. 부식 임계치의 영향도를 알아보기 위하여 Fig. 13에 각 임계치에 따른 부식 개시 확률을 시간에 따라 터널 외벽과 내벽에 대해 구하였다. 터널 내벽에 대해서는 구조물의 설계내구수명 100년에서의 부식 확률이 부식 임계치 1.2kg/m³, 0.4%, 0.69%에 따라 각각 23.1, 13.0, 2.9%임을 알 수 있었으며, 터널 외벽에서의 부식 개시 확률은 각각 2.3, 1.12, 0.2%임을 알 수 있었다. 또한 부식 확률이 10%에 도달하기까지의 기간을 나타내는 구조물의 염해 내구수명은 부식 발생 임계치 1.2kg/m³, 0.4%, 0.69%에 대해 터널 내벽에서 각각 60, 86, 178년이며, 터널 외벽에서 160, 192, 283년임을 알 수 있다. 부식 확률의 예측 결과로부터 국내 제시 값인 1.2kg/m³의 임계치는 0.69%의 부식 확률에 비해 약 10배정도 큰 결과값을 보여주고 있으며, 내구수명 예측에 있어서도 약 120년 가량 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 보다 합리적인 콘크리트 구조물의 염해 내구성능 예측을 위해서는, 콘크리트 구조물의 철근 부식을 발생시키는 임계 염소이온농도의 구조물 내외적 영향

을 전반적으로 고려하여 보다 합리적인 임계치의 제안이 필요하다고 판단된다.

5.3 염소이온 확산의 시간의존성

염소이온 확산 속도의 감소는 재령에 따라 지속적으로 시멘트 수화반응이 발생하기 때문이다. 일반적으로 타설 후 28일에서 56일 사이에 전체 수화반응의 85에서 90%가 발생하며, 이후 장기적인 수화반응 과정에서 수화생성물이 콘크리트내 이온 이동의 주경로인 모세관 공극을 채워서 경로를 단절시키게 된다. 일반적으로 D 의 시간에 대한 감소는 시멘트 혼화재에 의해 영향을 받는다. 특히 PFA나 GGBS를 혼입한 콘크리트의 경우에는 이러한 경향이 문헌을 통해 보고되고 있다. Thomas and Bamforth (1999)는 8년간의 폭로시험을 통해 PFA와 GGBS 콘크리트의 경우 확산계수의 시간에 대한 감소가 OPC 콘크리트에 비해 더 크게 나타남을 보고하였다. 초기 180일에서의 확산계수값이 거의 동일하였음에도, 8년간의 실험 결과 OPC 콘크리트의 확산계수가 $8.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 인데 비하여, 30% PFA와 70% GGBS 콘크리트의 경우에 각각 $0.59 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $0.63 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났다. 본 연구에서도 이러한 염소이온 침투의 시간의존성의 영향을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 터널 외벽의 경우에 C_s 가 동일함에도 불구하고 시간의존성을 고려하였을 때 철근위치에서의 침투 염소이온농도가 거의 0에 수렴하고 있다. 반면, 시간의존성을 고려하지 않았을 때

에는 100년 노출시에 염소이온농도가 결합재 단위중량당 1.62%이었다. 따라서 시간의존성을 고려하지 않는 경우에는 콘크리트 내 철근 부식의 위험성을 과대평가하게 되어, 설계내구수명 만족을 위해 과도한 피복두께의 적용이나 불필요한 콘크리트 품질 향상 등이 요구될 것이다. 따라서 해안가 콘크리트 구조물의 보다 현실적인 내구수명의 예측을 위해서는 염소이온 확산의 시간의존성을 합리적으로 고려하여야 한다.

6. 결론

본 연구에서는 실제 현장 실험이나 문헌 자료를 바탕으로 각 염해 관련 변수의 변동성을 고려하여, 염해를 받는 해저 콘크리트 구조물의 내구수명을 확률론적 내구성 평가 기법을 적용하여 예측하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 염해관련 변수의 변동성을 평가하기 위하여 염소이온 확산계수와 피복두께를 실제 실험을 통해 확률특성을 구하였으며, 임계 염소이온농도는 기존에 보고된 문헌을 통해 구하였다. 그 결과 염소이온 확산계수의 평균치는 $3.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고 Weibull 분포를 따르며, 대상 부재인 터널 내벽과 외벽의 피복두께는 각각 45.5mm, 94.7mm으로 조사되었고, 정규분포를 따랐다. 또한 임계 염소이온농도의 평균은 결합재 단위중량당 0.69%이고 대수정규분포를 따르고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 각 변수의 확률적 특성에 근거하여 노출기간에 따른 철근위치에서의 염소이온 농도 분포를 구하였다. 재령이 증가할수록 침투 염소이온 농도의 평균값은 증가하며, 변동계수는 감소하게 됨을 알 수 있었다. 이는 비균질 재료인 콘크리트내에서 건전부와 취약부의 염소이온 확산 저항성의 차이 및 농도평형을 이루기 위한 취약부로부터 건전부로의 횡방향 염소이온 이동에 의한 것이라 판단된다.
- (3) 확률론적 염해 해석기법을 적용하여 콘크리트 터널 내벽과 외벽에 대해 내구수명을 평가하였다. 염소이온 침투의 시간의존성을 고려하지 않은 경우 터널 내벽과 외벽에 대해 각각 8년, 12년의 내구수명이 도출되었으나, 시간의존적 모델에서는 178년, 283년의 내구수명이 계산되어 구조물의 설계내구수명

(100년)을 만족하고 있음을 보였다. 따라서 구조물의 과다설계를 방지하고 보다 합리적인 내구수명 설계 및 평가를 위해서는 염소이온 확산의 시간의존성을 고려하여야 한다.

- (4) 본 연구에서 문헌 조사를 통해 구한 부식 발생 임계 농도를 현재 콘크리트 관련 기준에서 제시한 값과 비교 분석하기 위하여 대상 구조물에 대해 각 부식 임계치에 대해 내구수명을 평가하였다. 그 결과 국내 기준 제시값($1.2\text{kg}/\text{m}^3$)과 실험치(0.69%)를 비교하였을 때 약 120년가량 예측내구수명의 차이를 보였다. 따라서 보다 합리적인 콘크리트 구조물의 염해 내구성능 예측을 위해서는, 콘크리트 구조물의 철근 부식을 발생시키는 임계 염소이온농도의 구조물 내외적 영향을 전반적으로 고려한 합리적인 임계치의 제안이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 콘크리트 코리아 연구단 (Concrete Corea)의 재정적 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 콘크리트 표준시방서 내구성편, 2004.
2. 건설교통부, 콘크리트 표준시방서 유지관리편, 2005.
3. 한국콘크리트학회, 해양환경에서 염해를 받는 철근콘크리트조 구조물의 유지관리 지침(안), 특수환경 콘크리트 위원회, 2004.
4. 日本土木學會, コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.
5. ACI Committee 222, "Corrosion of metals in concrete", Manual of Concrete Practice, Part 3, American Concrete Institute, Detroit, USA, 1994.
6. Ann, K. Y. and Song, H.-W., "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", Corrosion Science, Vol. 49, I. 11, 2007, pp.4113-4133.
7. Bamforth, P. B. and Price, W. F., "Factors influencing chloride ingress into marine structures", Proceeding of conference on Concrete 2000. Economic and Durable Construction through Excellence, E & FN Spon, London, UK, 1993, pp.1105-1118.
8. Bamforth, P. B., "The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-years UK coastal exposure trials", Magazine of Concrete Research, Vol. 51, I. 2, 1999, pp.87-96.
9. British Standard 8110 Part 1, Structural Use of Concrete - Code of Practice for Design and Construction, British Standards Institute, London, UK, 1985.
10. CEB-FIP, "Model Code for Service Life Design", the

- International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6, 2006.
11. Collepardi, M., Marcialis, A. and Turriziani, R., "Penetration of chloride ions into cement pastes and concrete", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 55, No. 10, 1972, pp.534-535.
 12. DuraCrete, Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, Final Technical Report, Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram Programme, 2000.
 13. Gjrv, O. E., "Durability and service life of concrete structures", *Proceeding of The First fib Congress 2002*, Japan Prestressed Concrete Engineering Association, Tokyo, 6, 2002, pp.1-16.
 14. Kawamura, C., Tanimura, Y., Sogabe, M., Tottori, S., Hasegawa, M., and Higashigawa, K., "Study on the penetration of chloride ions into concrete based on investigation of railway structures", *Journal of the Japan Society of Civil Engineering*, Vol. 66, No. 781, 2005, pp.193-204.
 15. Mustafa, M. A. and Yusof, K. M., "Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 4, 1994, pp.661-670.
 16. NT BUILD 492, Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiments, 1999.
 17. Pack, S.-W., Jung, M.-S., Song, H.-W., Kim, S.-H. and Ann, K.Y., "Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 2, 2010, pp.302-312.
 18. Page, C. L., "Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine structure", *Nature*, Vol. 258, No. 5535, 1975, pp.514-515.
 19. Page, C. L., Short, N. R. and Holden, W. R., "The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel", *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, No. 1, 1986, pp.79-86.
 20. Song, H.-W., Pack, S.-W. and Moon, J. S., "Durability evaluation of concrete structures exposed to marine environment focusing on a chloride build-up on concrete surface", *Proceedings of the International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures*, Nagaoka, Japan, 2006, pp.1-9.
 21. Song, H.-W., Pack, S.-W. and Ann, K. Y., "Probability-based service life prediction of fixed link bridge exposed to a marine environment", *The 4th Civil Engineering Conference in the Asian region*, Taipei, Taiwan, 2007, pp.25-28.
 22. Song, H.-W., Pack, S.-W. and Ann, K. Y. "Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reinforced concrete tunnel box exposed to sea water", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 10, 2009, pp.3270-3278.
 23. Song, H.-W., Jung, M.-S., Ann K. Y. and Lee C.-H., "The influence of chemistry of chloride ions in cement matrix on corrosion of steel", *ACI Material Journal*, Vol. 107, No. 4, 2010, pp.332-339.
 24. Tikalsky, P. J., Pustka, D. and Marek, P., "Statistical variations in chloride diffusion in concrete bridges", *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 3, 2005, pp. 481-486.
 25. Thomas, M. D. A., "Marine performance of PFA concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 43, No. 156, 1991, pp.171-185.
 26. Thomas, M. D. A. and Bentz, E. C., *Life-365 Manual*, released with program by Master Builders, 2000.
 27. Weyers, R. E., Fitch, M. G., Larsen, E. P., Al-Qadi, I., Chamberlin, W. P. and Hoffman, P. C., *Concrete Bridge Protection and Rehabilitation: Chemical and Physical Techniques. Service Life Estimates*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC, 1994.

(접수일자 : 2010년 8월 27일)

(수정일자 : 2010년 12월 29일)

(심사완료일자 : 2011년 1월 20일)

요 지

본 연구에서는 철근 콘크리트 터널 구조물을 해상 대기중 비래염분이 침투하는 터널 내벽과 해수에 향시 접촉하는 터널 외벽으로 구분하여, 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 철근 부식 개시 확률을 예측하였다. 염해관련 변수의 변동성을 평가하기 위하여 염소이온 확산계수, 표면 염소이온농도, 피복두께, 임계 염소이온농도를 실제 실험 및 문헌 조사를 통해 확률특성을 구하였다. 그 결과 염소이온 확산계수의 평균치는 $3.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 이었으며, 대상 부재인 터널 내벽과 외벽의 피복두께는 각각 45.5mm, 94.7mm으로 조사되었고, 임계 염소이온농도의 평균은 결합재 단위중량당 0.69%이었다. 각 변수의 확률적 특성에 근거하여 노출기간에 따른 철근위치에서의 염소이온 농도 분포를 구하였다. 재령이 증가할수록 침투 염소이온 농도의 평균값은 증가하며, 변동계수는 감소하게 됨을 알 수 있었다. 또한 확률론적 염해 해석기법을 적용하여 콘크리트 터널 내벽과 외벽에 대해 내구수명 및 부식개시 확률을 평가하였다. 염소이온 침투의 시간의존성을 고려하지 않은 경우 터널 내벽과 외벽에 대해 각각 8년, 12년의 내구수명이 도출되었으나, 시간의존적 모델에서는 178년, 283년의 내구수명이 계산되어 구조물의 설계내구수명(100년)을 만족하고 있음을 보였다. 또한, 시간의존성을 고려하지 않은 경우 100년에서의 부식 개시 확률은 터널 내벽과 외벽에 대해 각각 59.5, 95.5%였으며, 시간의존성 모델에서는 2.9, 0.2%로 계산되었다. 따라서 구조물의 과다설계를 방지하고 보다 합리적인 내구수명 설계 및 평가를 위해서는 염소이온 확산의 시간의존성을 고려하여야 한다. 마지막으로 본 연구에서 문헌 조사를 통해 구한 부식 발생 임계 농도를 현재 콘크리트 관련 기준에 제시한 값과 비교하여 분석하였다.

핵심 용어 : 부식, 염소이온 확산계수, 표면 염소이온농도, 부식 발생 임계농도, 몬테카를로 시뮬레이션
