Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 19, No. 5, September 2015, pp.067-074
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.5.067
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

염해 실태조사를 통한 철근 콘크리트 교각의 내구수명 평가 -결정론적 및 확률론적 해석방법

권성준[1]*

Evaluation of Service Life in RC Column under Chloride Attack through Field Investigation: Deterministic and Probabilistic Approaches

Seung-Jun Kwon[1]*

Abstract: RC (Reinforced Concrete) structures are considered as cost-benefit and durable however performances of structural safety and durability are degraded due to steel corrosion. Service life in RC structure is differently evaluated due to different local environmental conditions even if it is exposed to the same chloride attack. In the paper, 25 concrete cores from field investigation are obtained from 4 RC columns with duration of 3.5～4.5 years exposed to sea water. Through total chloride content measurement, surface chloride contents and apparent diffusion coefficients are evaluated. Service life of the target structure is estimated through deterministic method based on Fick's 2nd Law and probabilistic method based on durability failure probability, respectively. Probability method is evaluated to be more conservative and relatively decreased service life is evaluated in tidal zone and splash zone over 40.0 m. Chloride penetration behavior with coring location from sea level and the present limitations of durability design method are investigated in the paper.

Keywords: Durability design, Deterministic method, Probability method, Apparent diffusion coefficient, Field investigation

1. 서 론

콘크리트 구조물은 경제적이고 고내구성인 건설재료이지만 사용기간의 증가에 따라 내구적인 문제가 발생한다. 이러한 내구적인 문제점은 구조적인 문제로 진전되는데, 콘크리트 내부의 철근부식은 가장 중요하게 고려된다. 특히 염화물 이온은 전달속도가 빠르고 부식에 가장 치명적으로 영향을 주므로 염해(Chloride attack)는 가장 중요한 열화요인중 하나이다(Broomfield, 1997; RILEM, 1994).

콘크리트 구조물이 대형화되면서 내구수명 및 이에 대한 설계가 중요하게 대두되고 있다. 1990년대까지는 주로 사양에 의한 설계가 지배적이었는데, 이는 최소피복두께, 최대물-결합재 비 등에 의한 설계사양에 집중되어 있다(RILEM, 1994; CEB-FIP, 2006). 시방서의 경우 목표내구수명 등이 설정되어 있지 않고 품질 변동성에 의한 영향이 고려되어 있지 않다. 이후 성능평가형 설계가 도입되면서 내구성에서는 정량적인 평가를 통한 내구수명 평가가 시도되고 있는데, 현재 가장 많이 시도되고 있는 설계방법이라고 할 수 있다. 주로 겉보기 확산계수를 통하여 유입된 염화물량을 평가하고 이를 고려하여 내구수명을 평가하는데, 목표내구수명동안 철근의 위치에서 부식을 야기하는 임계염화물량보다 유입된 염화물량이 작도록 유도하는 방법이다. 이 역시 혼화재료의 영향, 확산계수의 시간의존성 등 많은 문제점이 지적되고 있으며, 현재 수준에서는 가장 정량적인 평가방법이라고 할 수 있다(Thomas and Bentz, 2002; ACI, 1994, KCI, 2004; JSCE, 2002).

이러한 정량적인 설계방법도 설계, 재료, 시공 등의 불확실성으로 인해 추가적인 연구가 수행되고 있다. 균열부, 타설이음부 등의 취약부에 대한 염화물 거동 분석(Park et al., 2012a,b), NNA(Neural Network Algorithm), GA(Genentic Algorithm)와 같은 최적화기법을 통한 염화물 확산계수의 분석(Song et al., 2009; Kwon and Kim, 2012), 염화물 이온의 확산과 이동을 같이 고려하는 연성해석기법 등(Maekawa et al., 2003; Maekawa et al., 2009) 다양한 방법으로 열화해석 및 내구수명을 고려한 설계기법이 제안되고 있다.

1990년대 일부 연구자들에 의해 확률론적인 방법으로 내구수명을 평가하려는 시도는 현재의 수준으로는 시방서에서

[1]정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 조교수, 교신저자
***Corresponding author:** jjuni98@hannam.ac.kr
•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2015 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제안하기는 어려운 수준이다. 확률론적인 내구수명 평가는 목표 내구수명 동안 부식이 발생할 확률이 내구성 파괴확률보다 낮도록 유도하는 방법인데, 정량적 및 확률론적인 방법 모두 한계상태의 정의와 열화를 구현하는 지배방정식을 필요로 한다. 본 연구에서는 3.5년~4.5년 해수에 노출된 RC 교각에 대한 실태조사 결과를 이용하여 Fick's 2nd Law를 기본으로 한 결정론적인 설계기법과 확률론적인 설계기법을 비교하도록 한다. 이를 위하여 해수조건과 콘크리트 코어가 채취된 높이를 고려하여 총 25개의 콘크리트 코어가 채취되었으며 겉보기 확산계수와 표면염화물량을 평가하였다. 본 연구에서는 각 방법에 따른 염화물 거동 해석과 이를 고려한 내구수명 평가방법이 다루어지며 노출환경에 따른 염화물 거동에 대한 분석이 수행되었다.

2. 결정론적인 방법 및 확률론적인 방법에 의한 내구 수명 평가

2.1 결정론적 방법(Deterministic Method)

결정론적인 방법은 염화물 이동에 대한 지배 방정식을 이용하여 거동을 평가한다. 현재의 염화물 평가 방정식은 크게 Nernst-Einstein 방정식을 사용하여 자유염화물 및 고정염화물의 상평형까지 고려하는 해석기법(Maekawa et al., 2003; Maekawa et al., 2009; Song et al., 2006)과 실태조사로부터 도출된 겉보기 확산계수를 이용하여 염화물 거동을 평가하는 방법이 있다(RILEM, 1994, Thomas and Bentz, 2002; Yokozeki et al., 1998). 본 연구에서는 실태조사 결과에 따라 도출된 코어 콘크리트의 전 염화물을 도출하였으며, 겉보기 확산계수에 대한 식을 사용하였다. 식 (1)에서는 겉보기 확산계수를 통한 염화물 거동을 나타내고 있다.

$$C(x,t) = C_s\left[1-erf(\frac{x}{2\sqrt{\overline{D}t}})\right],\ \overline{D} = D_{28}\left(\frac{t_{28}}{t}\right)^m \quad (1)$$

여기서 C_s는 표면염화물량, x 및 t 콘크리트 깊이 및 시간, erf는 오차함수를 나타낸다. $\overline{D}$는 시간의존적 확산계수이며, 재령 28일 확산계수(D_{28})과 기준 시간(t_{28})을 포함하고 있다. 결정론적인 방법에서는 콘크리트로 유입된 염화물량이 최외곽 철근 위치에서 임계염화물량을 넘지 않도록 한계상태를 정하고 있다.

2.2 확률론적인 방법(Probabilistic Method)

확률론적인 방법은 주로 MCS(Monte Carlo Simulation)을 이용하여 확률변수들에 대한 변동성을 고려한다. Fig. 1에서는 확률론적인 설계방법의 개요도를 나타내었는데(Duracrete, 2000), 열화외력(S_t)은 시간에 따라 증가하는 유입된 염화물량으로 하였으며, 저항내력(R_t)는 부식발생의 임계염화물량으로 설정하였다. 식 (2)에서는 본 연구에서 적용되는 확률론적 설계의 지배방정식을 나타낸다.

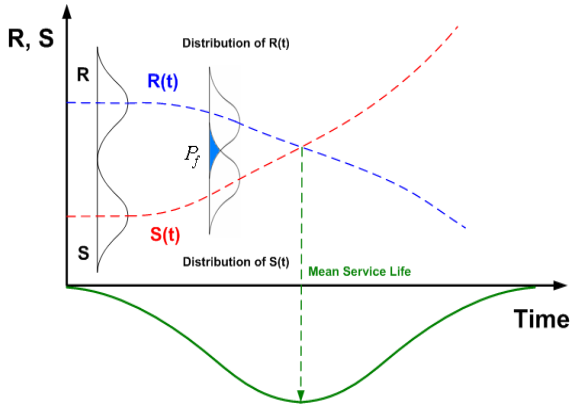


Fig. 1 Concept of probabilistic method for durability design

$$P\left\{C_{cr}(\mu,\sigma) < C_s(\mu,\sigma)\left[1-erf(\frac{x(\mu,\sigma)}{D(\mu,\sigma)t})\right]\right\} < P_{\max} \quad (2)$$

여기서, $C_{cr}(\mu,\sigma)$는 임계 염화물량의 확률변수이며, $P_{\max}$는 목표내구수명동안 유지되어야 하는 내구성확률의 최대치이다.

일반적으로 식 (2)와 같은 염화물 거동의 확률변수에서는 확산계수, 피복두께, 표면염화물량에 대한 확률변동성이 고려된다(Kwon et al., 2009; Kwon et al., 2007).

3. 대상구조물의 실태조사

3.1 실태조사 개요

대상구조물은 해상부에 위치한 RC 교각으로 간만대와 해수면위의 부재를 대상으로 지름 100 mm의 코어를 채취하였다. 설계 강도는 24 MPa이며, 일부 시공불량개소에 국부적인 철근부식이 발생하여 외부에 녹물이 발생하여 보수를 끝낸 상황이었다. 존치기간은 타설후 3.5년~4.5년 경과후의 RC 구조물이며, 해수면위의 4.8~48.4 m의 위치에서 코어를 25개 채취하여 AASHTO T 260에 의거하여 전염화물량을 평가하였다(AASHTO, 1997). 가장 낮은 수위를 기준점으로 하였을 때, 간만에 의해 해수가 가장 높이 올라오는 지점은 6.0 m 지점이었으므로 0.0~6.0 m는 간만대로 정의할 수 있다. 대상

교각은 4개이며, 사용된 배합은 Table 1에 나타내었으며, 대상구조물의 코어채취 사진은 Fig. 2와 같다.

Table 1 Mix proportions of target RC column

Slump (mm)	Strength (MPa)	Cement	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)			
					W	C	S	G
130	24	Type-1	52.0	44.0	186	358	758	988

Fig. 2 Photos for core from field investigation

3.2 실태조사를 통한 염화물 거동 분석

총 4개의 교각에서 높이별로 채취한 전염화물 분포는 Table 2와 같으며, 회귀분석을 통하여 도출된 겉보기 확산계수 및 표면 염화물량은 Table 3과 같다. 확산계수 및 표면염화물량은 선형 및 비선형 회귀분석을 통해 도출되는데, $0 \leq 0 \leq z \leq \sqrt{3}$ 의 범위에서는 $erfc(z) = 1 - erf(z)$로 가정할 수 있으므로 실무적으로 많이 사용되는 선형회귀분석을 사용하였다. 식 (3) 및 식 (4)에서는 회귀분석과정을 나타내고 있다.

$$\sqrt{C} = \sqrt{C_o} - \sqrt{\frac{C_o}{12Dt}} \cdot x \tag{3}$$

$$y = b + ax \tag{4a}$$

$$y = \sqrt{C}, a = \sqrt{C_o}, b = -\sqrt{\frac{C_o}{12Dt}} \tag{4b}$$

Table 2 Results from field investigation (total chloride content)

No.	Height (E.L)	Total chloride content with depth (kg/m^3)					Exposure period
		5 mm	1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm	4.5 mm	year
A	4.8	6.737	3.288	1.008	0.176	0.157	3.73
		6.759	3.494	1.027	0.188	0.176	
	6.0	8.460	3.422	1.739	0.169	0.169	
		8.357	3.574	1.699	0.183	0.181	
	9.0	1.187	0.247	0.132	0.118	0.115	
		1.220	0.186	0.099	0.101	0.089	
	48.4	0.247	0.183	0.157	0.153	0.153	
		0.230	0.176	0.162	0.139	0.136	
B	4.8	13.376	11.327	9.095	6.336	3.168	3.82
		13.428	11.315	9.057	6.364	3.238	
	6.0	11.343	9.781	4.141	1.553	0.268	
		11.449	9.844	4.225	1.586	0.552	
	9.0	1.097	0.611	0.261	0.216	0.172	
		1.177	0.477	0.200	0.197	0.160	
	46.1	0.327	0.226	0.209	0.188	0.176	
		0.251	0.169	0.160	0.155	0.153	
C	11.5	0.303	0.143	0.136	0.136	0.108	4.73
D	4.8	9.844	6.531	3.523	2.404	0.846	4.71
		8.312	6.972	4.141	1.882	0.658	
	6.0	13.44	7.038	1.709	0.99	0.924	
		13.61	13.016	2.506	0.87	0.830	
	9.0	0.411	0.108	0.103	0.099	0.092	
		1.168	0.494	0.167	0.125	0.082	
	13.2	0.327	0.125	0.120	0.122	0.108	
		0.719	0.200	0.195	0.129	0.127	

식 (1)은 일정시간에서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있는데, 식 (4a)와 같이 일차함수로 고려할 수 있다. 그러므로 표면염화물량(C_0) 및 겉보기 확산계수(D)는 매개변수 a,b를 이용하여 도출할 수 있다. Fig. 3에서는 코어채취 높이에 따른 염화물 확산계수와 표면염화물 확산계수의 분포를 나타내고 있다.

Table 3 Derived diffusion coefficient and surface chloride content

Case	Height \ Types	Surface chloride content (kg/m^3)	Diffusion coefficient (m^2/sec)
A (3.73 years)	4.8	7.26	1.53×10^{-12}
		7.38	1.55×10^{-12}
	6.0	8.94	1.52×10^{-12}
		8.90	1.55×10^{-12}
	9.0	0.89	2.27×10^{-12}
		0.85	2.04×10^{-12}
	48.4	0.24	2.48×10^{-11}
		0.23	2.19×10^{-11}
B (3.82 years)	4.8	16.18	5.26×10^{-12}
		16.08	5.34×10^{-12}
	6.0	15.64	1.88×10^{-12}
		15.26	2.06×10^{-12}
	9.0	1.09	2.93×10^{-12}
		1.03	2.74×10^{-12}
	46.1	0.31	1.77×10^{-11}
		0.23	2.74×10^{-11}
C (4.73 years)	11.5	0.26	7.24×10^{-12}
D (4.71 years)	4.8	11.37	2.15×10^{-12}
		10.88	2.09×10^{-12}
	6.0	12.25	1.05×10^{-12}
		11.80	1.45×10^{-12}
	9.0	0.31	3.53×10^{-12}
		1.10	1.66×10^{-12}
	13.2	0.26	6.33×10^{-12}
		0.58	2.83×10^{-12}

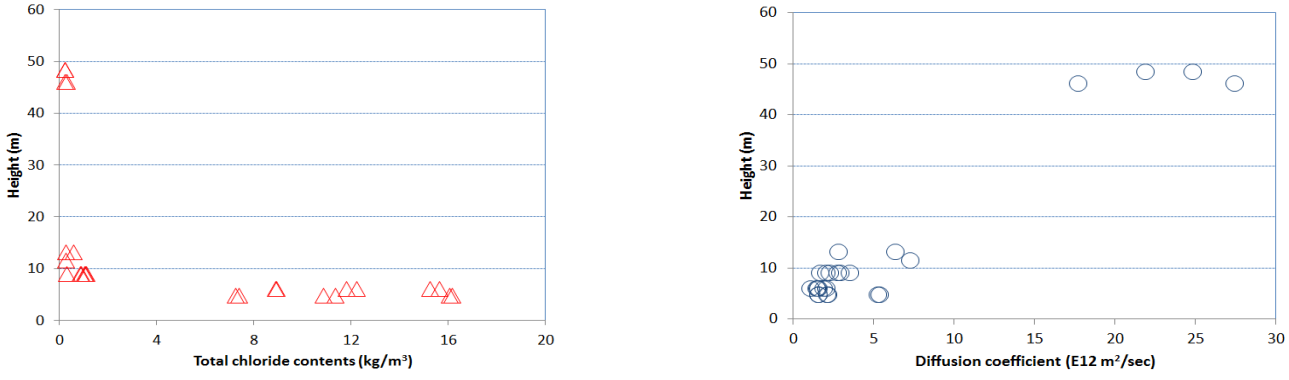
4. 대상구조물의 내구수명 평가

4.1 실태조사를 통한 염화물 거동 분석

대상 구조물에 대한 결정론적인 방법은 Fick's 2nd Law를 기본으로 한 Life 365를 사용하였는데, 입력값은 실태조사 결과를 사용하였다. 해석에 사용될 염화물 확산계수는 시간에 따라 감소하게 되는데(Thomas and Bentz, 2002), 대상 구조물은 3.7~4.7년 경과된 구조물이다. 각 존치기간을 고려하여 기준시간(28일)에서의 확산계수를 역추적 하였으며, 이를 대상으로 내구수명을 추정하였다.

또한 외부 표면염화물은 시간에 따라 선형적으로 증가 후 일정해지는 것으로 보고되고 있다(Thomas and Bentz, 2002). 이미 각 경과년수에 따른 표면염화물량이 실측자료로 조사되었으므로 이를 이용하여 선형적인 외부염화물량 증가를 고려하였으며, 최대값은 일반적인 해수수준인 18.0 kg/m^{3}으로 가정하였다. Table 4에서는 해석에 필요한 경계조건 및 입력변수를 정리하였으며, 표면염화물량의 변화는 Fig. 4에 도시하였다. Table 4에서 m은 시간의존성 확산계수로 보통 콘크리트의 경우 0.2를 사용하고 30년 경과후 염화물 확산계수는 일정한 것으로 가정하였다(Thomas and Bentz, 2002).

온도조건은 대상구조물의 노출환경을 고려하였으며, 높이에 따른 내구수명의 변화는 Fig. 5에 나타내었다. 높이 15 m정도까지는 내구수명이 증가하고 있으나 40 m이상에서는 오히려 낮은 표면염화물 농도에고 불구하고 내구수명이 감소되었다. 비록 표면염화물량이 낮음에도 불구하고 염화물 확산계수가 10^{-11} m^2/sec로 높은 수준이기 때문이다. 높이 10 m 이하



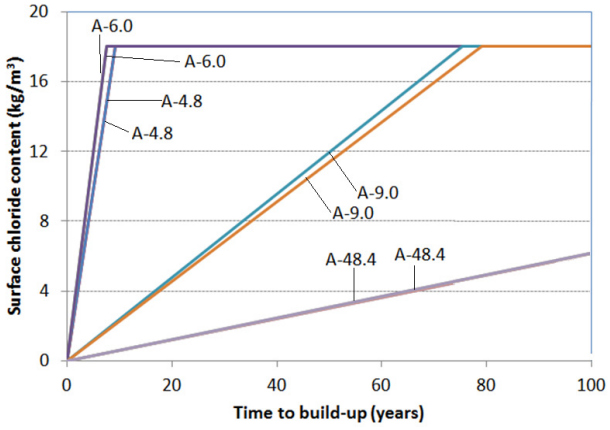
(a) Total chloride contents with height

(b) Diffusion coefficient with height

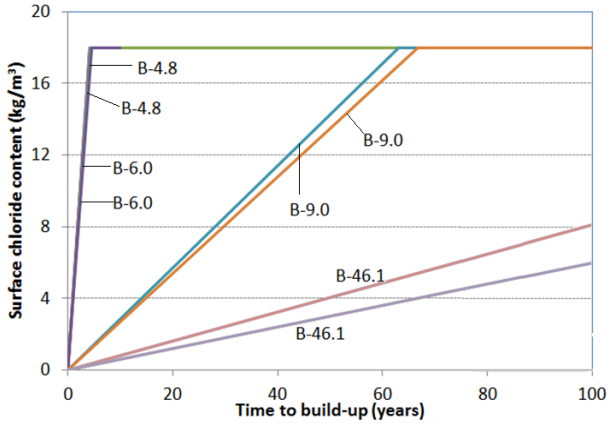
Fig. 3 Total chloride content and diffusion coefficient from field investigation

Table 4 Input variables for deterministic method

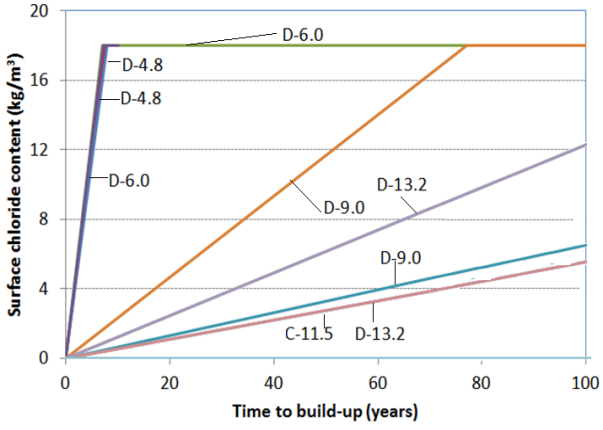
Cover depth (mm)	m	Time to built-up	Critical chloride content
95.0 mm	0.2	10 years	1.2 kg/m^3



(a) RC-A



(b) RC-B



(c) RC-C, D

Fig. 4 Time to built-up of surface chloride content

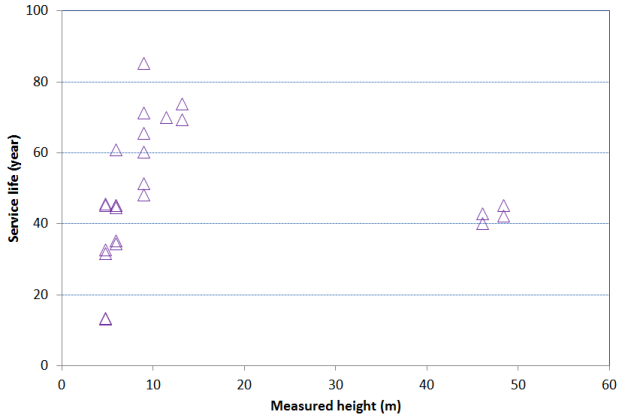


Fig. 5 Service life variation with height

에서의 낮은 내구수명은 간만대에 의한 높은 표면염화물량으로, 40 m 이상에서는 측정된 확산계수로 인해 상대적으로 내구수명이 낮게 평가되었다.

4.2 확률론적 방법에 의한 평가

4.2.1 실태조사에 따른 확률변동성 분석

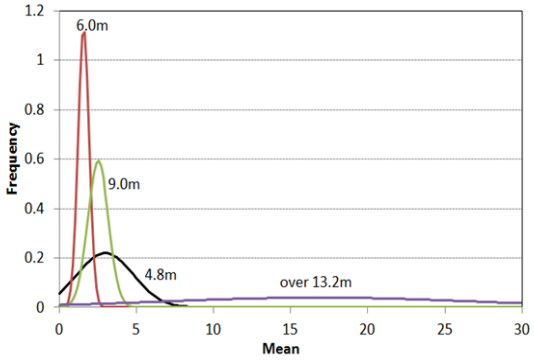
확률론적인 해석을 수행하기 위해서는 확률변수의 설정 및 분포가 필요하다. 본 절에서는 실태조사를 통하여 도출한 표면염화물량, 확산계수, 피복두께의 확률변수를 분석하였다. Table 5에서는 각 확률변수의 변동성을 나타내었으며, Fig. 6에서는 실태조사를 통한 표면염화물량과 확산계수 분포를 높이별로 도시하였다. Table 5에서 9.0 m 이상에서는 표면염화물량이 임계염화물량까지 증가하지 않으므로 내구수명은 현실적이지 않은 값이 도출된다. 이를 고려하기 위해 확률론적 해석시 표면염화물량을 1.2 kg/m^{3}으로 가정하여 해석을 수행하였다.

4.2.2 확률론적 해석에 따른 내구수명 평가

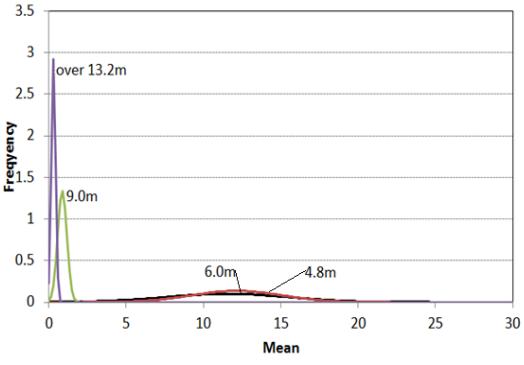
정량적인 해석에서는 확률변수의 시간의존성을 고려하여 해석이 가능하지만, 확률론적인 해석에서는 확률변수가 시간의존성에 따라 변화하는 것을 고려하기가 매우 어렵다. 이는 각 time step에 따라 확률변수가 변동하는 것이 MCS에 도입되어야 하는데, 이는 매우 어려운 난제이다. 본 해석에서는 Table 5의 확률변수를 이용하여 공용부터 이러한 특성을 가진다고 가정하고 확률론적인 해석을 수행하였다. 각국의 시방규정에서는 7.0～10.0% 정도로 부식에 이르는 확률을 내구적 파괴확률로 정하고 있는데(KCI, 2004; JSCE, 2002; EN, 2000), 본 연구에서는 국내 시방서에 따라 부식발생확률이 10.0%에 도달하는 기간을 내구수명을 설정하였다(KCI, 2004, Kwon et al., 2009). 기존의 연구를 참고하여 피복두께, 표면염화물량,

Table 5 Probabilistic variables with height from field investigation

	Chloride diffusion coefficient ($\times 10^{-12}$ m^2/sec) -Normal distribution			
	4.8 m	6.0 m	9.0 m	over 13.2 m
mean	2.987	1.585	2.528	16.827
STD	1.811	0.353	0.674	10.079
COV	0.606	0.223	0.266	0.599
	Surface chloride content (kg/m^3)- Normal distribution			
	4.8 m	6.0 m	9.0 m	over 13.2 m
mean	11.525	12.132	0.878(1.2)	0.308(1.2)
STD	3.955	2.927	0.297	0.136
COV	0.343	0.241	0.338	0.443
	Cover depth (mm)- Normal distribution			
	4.8 m	6.0 m	9.0 m	over 13.2 m
mean	95.24	94.72	94.82	94.05
STD	9.710	10.601	12.134	10.251
COV	0.102	0.112	0.128	0.109
	Critical chloride content (kg/m^3)- Log normal distribution			
mean	1.20			
STD	0.24			
COV	0.20			



(a) Diffusion coefficient distributions from field investigation



(b) Surface chloride content distributions from field investigation

Fig. 6 Probabilistic variation of diffusion coefficient and chloride content

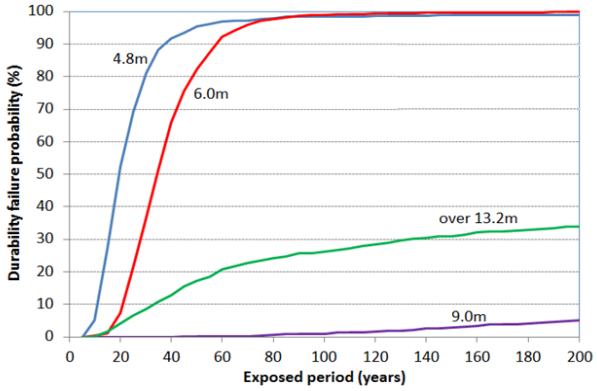


Fig. 7 Exposed period and durability failure probability

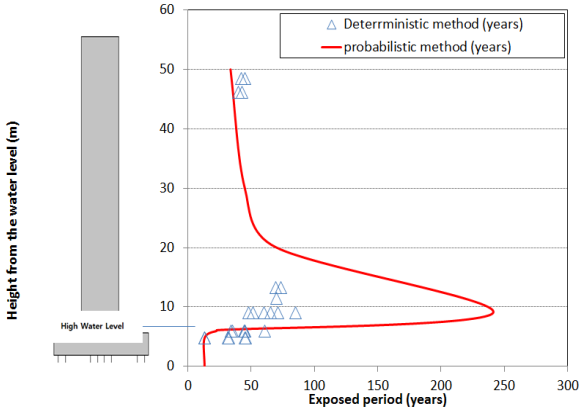


Fig. 8 Predicted service life from different estimation methods along RC height

염화물 확산계수는 정규분포로, 임계염화물량은 로그정규분포로 가정하였다(Song et al., 2009). Fig. 7에서는 각 부재에 따른 내구적 파괴 확률변화를 높이에 따라 도시하였다.

Fig. 8과 같이 높이별 예측된 내구수명에 대해서는 서로 다른 내구수명의 변화가 평가되었다. 일반적으로 확률론적인 내구수명 평가는 결정론적인 내구수명 평가보다 엄격하게 평가되는데, 이는 내구성 파괴확률을 10.0%로 낮게 설정하기 때문이다. Fig. 7에서 0.0~4.8 m 범위에서는 큰 차이가 발생하지 않았으나 비말대 지역(6.0~9.0 m)에서는 큰 차이가 발생하였다. 이는 정량적인 방법에서는 시간의존성 확산계수를 사용하여 확산계수의 감소가 고려된다. 그러나 확률론적인 방법에서는 시간의존성 확산계수가 고려될 수 없으므로 큰 오차가 발생하였다. 이후 10 m 이상에서는 실태조사에서 도출된 확산계수가 높게 평가되었는데, Fick's 2nd Law를 가정하여 확산계수와 겉보기 확산계수를 도출하였기 때문이다.

간만대에서는 결정론적 방법으로 13.4~60.9년이, 확률론적인 방법에서는 13.2~22.8년의 내구수명이 평가되었다. 40 m 이상의 높은 비말대 위치에서는 두가지 방법에서 모두 40

년 이상의 내구수명이 평가되었으나 확률론적인 설계가 좀 더 보수적으로 나타났다. 낮은 표면염화물량에서는 Table 3에서 알 수 있듯이 높은 확산계수가 도출되게 된다. 또한 표면염화물량이 1.2 kg/m^{3}까지 증가하지 않은 상태에서는 내구수명 예측이 거의 무한대로 나오게 된다. 즉 10년 이상의 노출기간을 가짐으로서 높은 표면염화물량을 가진 확률분포자료에서 내구수명이 올바르게 평가될 수 있다.

5. 결 론

1) 3.5년~4.5년간 해안가에 노출된 RC 교각에 대한 실태조사 결과를 이용하여 결정론적인 해석을 수행하였는데, 주기적인 침지가 되는 6.0 m 이하에서는 높은 표면 염화물량 비교적 낮은 확산계수가 평가되었다. 비록 비말대(6.0 m 이상)에서는 낮은 표면 염화물량이 측정되었으나 표면염화물량은 농축되므로 내구수명 평가 및 유지관리는 필요하다.
2) 확률론적인 해석을 수행하기 위해 피복두께, 표면염화물량, 염화물 확산계수, 임계염화물량으로 설정하고 실태조사에 근거한 확률변수를 설정하였다. 분석결과 9.0 m 이하에서는 비교적 안정적인 확률변동성이 평가되었으나 비말대 지역에서는 표면염화물 및 확산계수의 편차가 크게 발생하였다.
3) 두 방법에 의해 도출된 내구수명 평가 결과, 확률론적인 방법에 의한 결과가 좀 더 보수적인 설계를 유도하는데, 이는 내구적 파괴확률이 10.0%로 낮은 수준이기 때문이다. 또한 13.2 m 이상의 높이에서는 확률론적인 방법에서 매우 높은 내구수명이 도출되었다. 이는 비교적 높은 확산계수와 표면염화물량이 실태조사에서 조사되었기 때문이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-286 2013R1A1A2060114)이며 저자는 이에 감사드립니다

References

1. Broomfield, J.P., Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, 1977, pp.1-15.
2. RILEM, Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 1994, pp.28-52.
3. CEB-FIP, Model Code for Service Life Design, The International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6, 2006, pp.16-33.
4. Thomas MDA, Bentz EC, life-365^{TM} Service Life Prediction Model^{TM} and Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides, SFA, 2002.
5. ACI Committee 201, Guide to durable concrete, Manual of Concrete Practice Part 1. Detroit USA: American Concrete Institute, 1994.
6. Korea Concrete Institute, Concrete standard specification durability part, 2004.
7. JSCE-Concrete committee, Standard specification for concrete structures, 2002.
8. Park, S.S., Kwon, S.-J., Jung, S.H., Lee, S.W., “Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure,” Construction and Building Materials, 27(1), 2012, pp.597-604.
9. Park, S.S., Kwon, S.-J., Jung, S. H., “Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation”, Construction and Building Materials, 29(2), 2012, pp.183-192.
10. Song, H.-W., Kwon, S.-J., “Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure,”Cement and Concrete Research, 39(9), 2009, pp.814-824.
11. Kwon, S.-J., Kim, S.C., "Concrete mix design for service life of RC structures exposed to chloride attack,” Computers and Concrete, 10(6), 2012, pp.587-607.
12. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T., "Multi-Scale Modeling of Concrete Performance,” Journal of Advanced Concrete Technology, 1(2), 2003, pp.91-126.
13. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T., "Multi-Scale Modeling of Structural Concrete,” Tylor&Francis, London and Newyork, 1st Edition, 2003, pp.291-352.
14. Song, H.-W., Pack, S.W., Lee, C.H., Kwon, S.-J., Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration,” Journal of Restoration Buildings and Monuments, 1(2), 2006, pp.265-284.
15. Yokozeki, K., Okada, K., Tutsumi, T., Watanabe, K., "Prediction of the service life of RC with crack exposed to chloride attack,” Journal of Symposium: Rehabilitation of Concrete Structure, 10, 1998, pp.1-6.
16. DuraCrete Final Report, DuraCrete Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, 2000.
17. Kwon, S.-J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H., "Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: probabilistic approach for chloride diffusion,”Structural Safety, 31(1), 2009, pp.75-83.
18. Kwon, S.-J., Park, S.S., "A study on estimation for chloride diffusivity in cracked concrete in harbor structures through field survey,” Journal of KSCE, 27(5A), 2007, pp.745-752.
19. AASHTO T260, Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials, 1997, pp.25-32.
20. EN 1991, Eurocode 1: Basis of design and actins on structures,

CEN, 2000, pp.12-18.
21. Song, H.-W., Pack, S.W., 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, 23(10), 2009, pp.3270-3278.

Received : 04/24/2015
Revised : 06/03/2015
Accepted : 06/10/2015

요 지 : 콘크리트 구조물은 경제적이고 내구적인 구조물이지만 철근부식에 따라 성능이 내구적, 구조적 저하하게 된다. 최근들어 내구성설계가 도입되고 있는데, 콘크리트 구조물의 내구수명은 해수에 같이 노출되더라도, 국부적인 노출환경과 설계방법에 따라 다르게 평가된다. 본 연구는 3.5년~4.5년 해수에 노출된 4개의 RC 교각을 대상으로 실태조사를 수행하여 25개의 콘크리트 코어를 채취하였으며, 전염화물을 평가하여 표면염화물량 및 겉보기 확산계수를 도출하였다. Fick's 2nd Law를 기본으로 한 결정론적 방법과 임계확률을 고려한 확률론적인 방법을 수행하여 내구수명을 각각 평가하고 분석하였다. 확률론적인 방법은 보수적으로 평가되었으며, 같은 구조물이라 하더라도 간만대 및 40.0 m 이상의 비말대에서는 비교적 낮은 내구수명이 평가되었다. 본 연구에서는 코어채취높이에 따른 염화물 거동 분석과 내구성 설계방법의 현시점에서의 한계성이 분석되었다.

핵심용어 : 내구성 설계, 정략적 방법, 확륜론적 방법, 겉보기 확산계수, 실태조사