



철근 부식속도 예측식을 이용한 철근 피복 파괴 시간 추정

장봉석^{1)*}

¹⁾한국수자원공사 수자원연구원

(2005년 8월 2일 원고접수, 2006년 1월 16일 심사완료)

Estimation of Concrete Cover Failure Time Considering the Corrosion Rate in Reinforced Concrete Structures

Bong-Seok Jang^{1)*}

¹⁾Korea Institute of Water and Environment, KOWACO, Daejeon 305-730, Korea

(Received August 2, 2005, Accepted January 16, 2006)

ABSTRACT

In lifetime estimation, the FEM analysis method is proposed for predicting corrosion failure time of concrete structures exposed to sea-water. This study shows that the corrosion rate of rebar in artificial pore solution can be transferred to the corrosion rate of rebar in concrete using the relationship between pore volume and concrete volume by Jennings' model. And this study considered the pitting corrosion effects of reinforcement bar on corrosion failure analysis, rebar size to cover depth and nonlinear crack analysis. These analysis results have good accordance with the experimental results of Williamson's work. This methodology can be applied to lifetime prediction procedure of reinforced concrete structures and also gives more reasonable results of concrete cover failure time estimation of reinforced concrete structures exposed to sea-water.

Keywords : corrosion rate, cover failure time, nonlinear analysis

1. 서 론

해수환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 사용수명 예측은 구조물의 설계 또는 유지관리에서 필수적이며, 이에 대한 예측 방법들이 다양하게 제시되고 있다. 염해 환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 내구수명 산정은 일반적으로 철근의 위치까지 염소이온이 침투하여 임계농도에 도달하는 시간까지를 내구수명으로 추정하는 방법을 사용해왔으나¹⁵⁾ 최근 들어 철근 덮개에 균열이 발생하는 시기까지를 구조물의 수명으로 정의하여도 사용성, 안전성 등을 확보한 상태에서 경제성까지 고려할 수 있는 것으로 받아들여지고 있다.

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 사용수명 예측을 위한 방법론 중에서 철근 위치까지의 염소이온 침투가 이루어진 이후, 철근 부식에 의한 콘크리트 덮개의 균열 발생 시점 예측을 해석적 방법으로 도출하기 위하여 주요 변수인 철근 부식속도, 부식에 의한 내부팽창압력 그리고 해석에 미치는 다른 인자들의 영향을 고찰하였다.

철근 피복에 균열이 발생하는 시점 즉 철근 피복의 파괴시점을 결정하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다^{1,4,7,11)}. 탄성튜브를 삽입한 콘크리트 시험체에 내부에 유압을 작용하여 철근 부식에 의한 팽창압을 모사한 실험¹⁴⁾, 외부 전류에 의한 철근의 촉진부식 실험²⁰⁾ 등의 연구 결과들이 보고되었다. 외부전류에 의한 부식모사는 적용한 부식전류의 크기에 따라 철근 부식에 의한 팽창압력, 철근 피복의 파괴 압력, 파괴 부식량 등 매우 상이한 결과들을 제시하고 있으며, 유압에 의한 팽창압 모사는 철근 부식의 초기에 콘크리트의 내부 공극 등으로 침투되어 팽창압을 유발하지 못하는 현상을 반영하지 못하는 한계점들을 가지고 있다.

이는 실제 철근 부식에 의한 현상을 반영하지 못하여 철근 부식에 의한 철근 피복의 파괴시점을 예측하기에 한계를 가지고 있으며, 이를 극복하기 위하여 철근 부식속도, 유발 팽창압력 등에 대한 체계적인 방법론이 필요하다.

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 철근 부식속도로부터 철근 부식에 의한 팽창압력을 고려한 비선형 해석을 통하여 철근 피복의 균열 발생 및 발생 시기를 합리적으로 고려하기 위한 방법론을 제시하였다^{18,19)}. 또한, 본 연구에서는 철근의 부식속도를 산정하기 위하여 모사세공용액 (artificial pore solution) 중의 염소이온 농도에 따른 철근

* Corresponding author

E-mail : svic@hanafos.com

©2006 by Korea Concrete Institute

부식속도를 측정하였으며, 철근 부식에 의해 발생하는 부식팽창압력을 결정하는 방안과 비선형 해석을 통한 철근 덮개 파괴 시점 추정을 위한 해석 방법을 제시하고자 하였다.

2. 철근 부식속도 측정 실험

콘크리트 중의 철근 부식속도는 콘크리트 내의 습윤 상태와 산소 공급량 등에 따라서 영향을 받으며, 콘크리트 내의 철근 부식속도를 현장에서 직접 측정하는 것은 실제 발생하고 있는 부식속도보다 큰 값을 나타내는 경향을 보이고 있다^{12,13)}. 따라서 본 연구에서는 인공세공용액 중의 철근 부식속도를 측정하고 이를 콘크리트 중의 철근 부식속도로 변환하였다. 이 과정에서 몇 가지 가정을 도입하였는데, 해수에 직접 노출되어 있는 구조물의 경우 콘크리트 내의 내부 공극 전체가 완전히 포화상태라는 것, 염소이온 농도와 세공용액의 pH에 따라 부식속도가 선형성을 가지는 것으로 가정하였다.

2.1 부식속도

일반적으로 금속의 부식속도는 시간에 따른 부식 진행 깊이 또는 부식중량 등으로 표현한다. 철근콘크리트에 있어서 철근의 부식속도는 구조물의 안정성과 사용성에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다. 철근콘크리트 구조물의 철근 부식속도는 구조물이 노출되어 있는 환경에 따라 크게 영향을 받으며 동일 구조물에서도 부위에 따라서 부식속도가 다르게 나타난다.

기존의 연구들에서 콘크리트 내의 철근 부식속도는 일정하다는 가정을 하였으나, 이는 실제 콘크리트 내의 철근 부식의 진행이 주로 pitting corrosion의 형태라는 사실을 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는, 해수에 노출된 구조물의 경우 외부 노출조건이 유사함을 고려하여, 철근 부식속도에 영향을 미치는 주된 인자를 철근주위의 염소이온 농도로 가정하였다.

이를 위하여 인공세공용액 중의 염소이온 농도를 주요 변수로 철근 부식속도 측정 실험을 수행하였다. 철근 부식속도의 측정은 Potentiostat / Galvanostat Model 273A 이용하여 부식전류밀도를 측정하였다.

2.2 실험 변수

콘크리트 중의 세공용액의 pH는 Ca(OH)₂를 이용하여 12.5 ± 0.1의 범위가 되도록 하였으며, 세공용액 중의 용존산소량은 대기 중에서 충분히 노출시켜 사용하였다. 인공 세공용액의 pH는 12 ± 0.1로 하였으며, 염소이온의 농도는 실제 환경에서의 염소이온 농도 범위가 되도록 0.05 mol/L, 0.1 mol/L, 0.3 mol/L, 0.5 mol/L 그리고 0.7 mol/L 으로 하였다.

Table 1 Corrosion current density

Chloride concentration (mol/L)	Corrosion current density (μA/cm ²)	pH
0.05	0.71	12.53
0.1	1.69	12.60
0.3	2.37	12.44
0.5	3.60	12.51
0.7	7.35	12.50

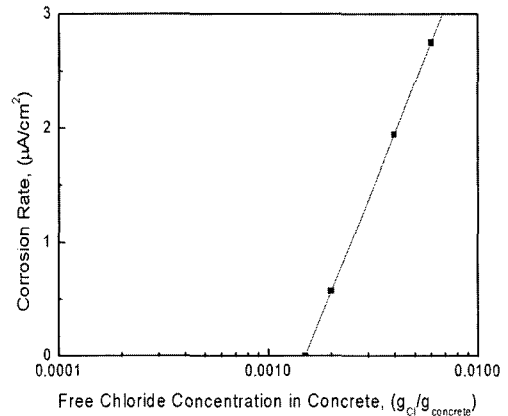


Fig. 1 Relationship between C_f and i_{corr}

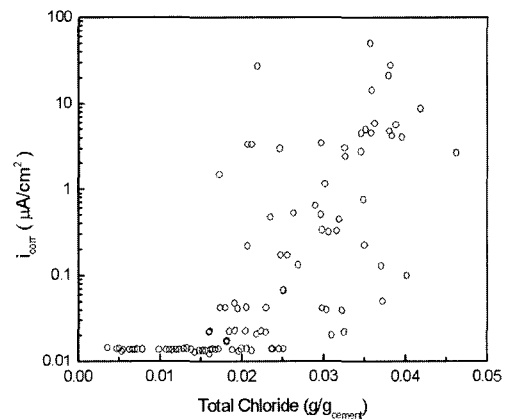


Fig. 2 i_{corr} according to total chloride concentration⁸⁾

2.3 실험 결과

측정한 부식전류 밀도는 Table 1에 나타내었으며, 그 결과는 Verbeck의 연구 결과⁵⁾와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 인공 세공용액 내의 철근 부식 시작 시점과 콘크리트 내의 철근 부식의 시작점이 같다는 가정을 사용하여, 본 실험의 결과를 콘크리트 내의 철근 부식속도로 환산하였으며, 그 결과는 식(2)와 Fig. 1에 나타내었다.

콘크리트 중의 세공용액의 부피는 Jennings' model⁸⁾을 사용하여 계산하였다.

$$\beta_{sol} = \frac{L_{pore\ solution}}{g_{concrete}} \quad (1)$$

여기서, β_{sol} 은 콘크리트 단위중량에 대한 세공용액의 부피, $L_{pore\ solution}$ 은 세공용액의 부피(L), $g_{concrete}$ 는 콘크리트 중량(g)

$$i_{corr} = 12.8742 + 4.559 \log(C_f) \quad (2)$$

여기서, C_f 는 자유염소이온량($g_{Cl}/g_{concrete}$)으로 콘크리트 중량비에 대한 자유염소이온량

본 연구에서는 부식 임계농도(threshold concentration of chloride)로 $0.0015\ g_{Cl}/g_{concrete}$ 을 사용하였다.

3. 콘크리트 피복 파괴 해석

3.1 팽창압력식 유도

Thick wall cylinder 탄성이론에서 외압 P_0 가 0이고, 철근 부식으로 인한 부피 팽창을 내부 변위 u 로 하여 팽창 압력 (P)을 유도하였으며, 철근의 부식에 의한 부피팽창 계수는 4를 사용하였다⁹⁾.

$$u = \frac{a^2 p_i r}{E(b^2 - a^2)} \left[(1 - \nu) + (1 + \nu) \frac{b^2}{r^2} \right] \quad (2)$$

$$P = \frac{2 E_{ef} d_s}{(d + 2d_0) \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 + a^2} + \nu \right)} \quad (3)$$

where, $E_{ef} = \frac{E_C}{(1 + \phi_{cr})}$, $a = (d + 2d_0)/2$

$$b = c + (d + 2d_0)/2$$

여기서, P 는 팽창압력, d_0 는 팽창압을 유발하지 않는 부식 두께, d_s 는 팽창압을 유발하는 부식두께, d 은 철근 직경, c 는 철근 피복, ν 는 푸아송비, E_{ef} 는 유효 탄성계수, and ϕ_{cr} 는 크리프상수

식(4)은 Williamson의 실험결과¹⁴⁾(실험 철근직경 4mm, 8mm)와 비교하여 본 연구의 해석결과를 검증하기 위하여, 철근 직경 $d=8$ mm, 철근 피복 $c=4$ mm, 푸아송비 $\nu=0.2$ 의 경우에 대하여 임의의 염소이온 농도에 1년간 노출되었을 경우의 철근 부식에 의한 팽창압력을 계산한 예이다.

$$P = E_{ef} [0.00604 + 0.00214 \log C_f] \quad (4)$$

여기서, P 는 팽창압력(N/mm^2), E_{ef} 는 크리프계수를 고려한 유효탄성계수이다.

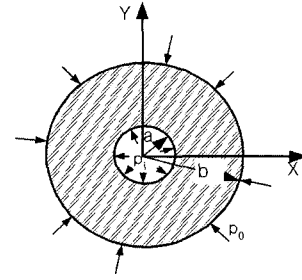


Fig. 2 Thick walled cylinder

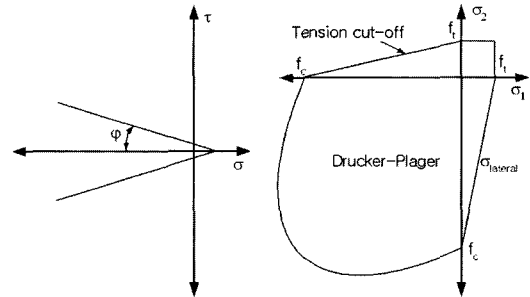


Fig. 3 Drucker-Plager compressive yield criteria¹⁵⁾

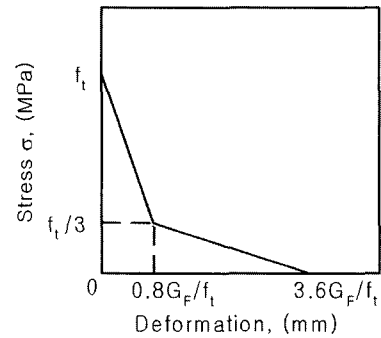


Fig. 4 Bilinear tension softening model(Hillerborg)¹⁵⁾

3.2 모델 및 해석 변수

해석에는 범용프로그램인 DIANA(Release 7, 1998)의 8절점 plane stress element(CQ16M)를 사용하여 비선형 해석을 수행하였다.

비선형 파괴해석을 위해 콘크리트의 소성모델은 Drucker-Plager Model과 bilinear tension softening 모델을 사용하였으며, 파괴에너지 G_f 는 $0.1\ N/mm$ 을 사용하였다¹⁷⁾(Figs. 3과 4). 해석 결과는 Williamson의 실험 결과와 비교하여 검증하였다.

또한, 부식분포의 비선형성을 고려한 해석을 수행하여 부식분포에 따른 철근 피복의 파괴 시간을 비교하였다. 해석에서 고려한 비선형 부식분포는 Figs. 5~6에 나타내었으며, 일반적으로 자연상태에서 non-uniform corrosion과 uniform corrosion의 부식 깊이비 α 는 4~8 정도인 것으로 알려져 있다⁵⁾. 본 연구에서는 α 를 2, 4, 8과 균일부식의

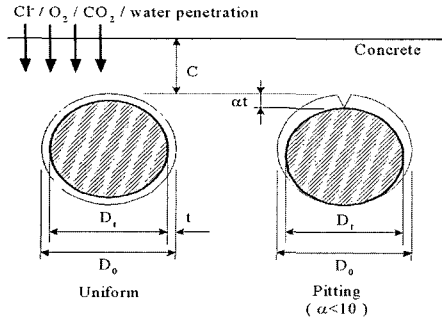


Fig. 5 Uniform and pitting corrosion

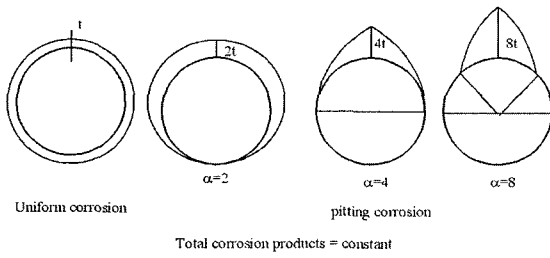


Fig. 6 Pressure distribution due to corrosion

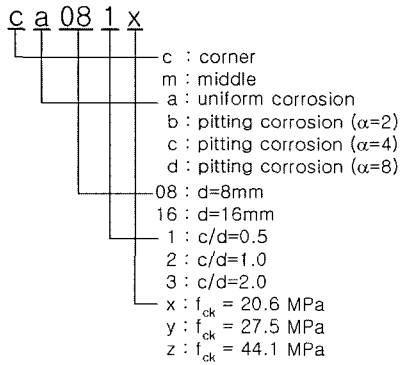


Fig. 7 Analysis variables

네 가지 변수, 철근의 직경, 콘크리트 강도 그리고 철근 피복 두께와 철근직경의 비(c/d)를 변수로 하여 해석을 수행하였다(Figs. 7~8).

3.3 해석 결과

유한요소 해석 결과는 Table 2와 Figs. 10~11에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 본 해석 결과와 Williamson의 실험 결과가 잘 일치하여 본 연구에서 제시한 해석 방법의 합리성을 알 수 있다. α 가 4인 경우와 8인 경우 그리고 부식이 일정한 경우를 비교해보면 (González et al.의 결과 α 는 4~8)⁵⁾, 철근의 부식분포가 균일하지 않은 경우의 철근 피복의 파괴를 일으키는 팽창압력이 철근 부식이 균일한 경우의 파괴압력보다 더 작음을 알 수 있다. 또한 α 의 값이 커질수록 파괴압력이 작아

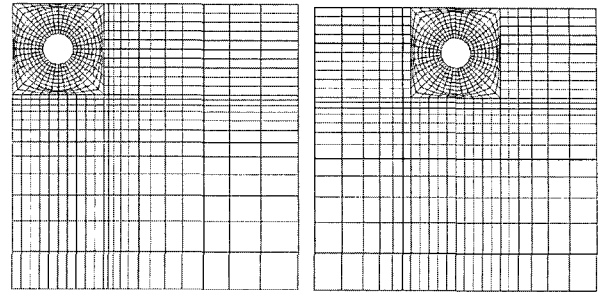


Fig. 8 Analysis mesh

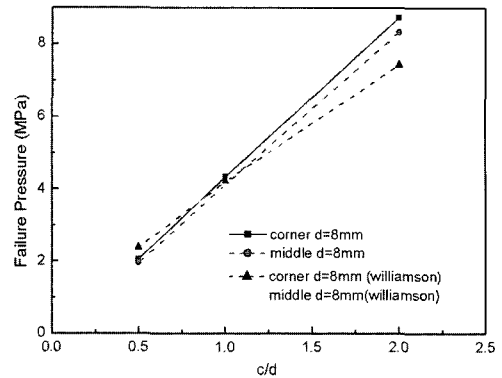


Fig. 9 Comparison with the result of Williamson

Table 2 Surface crack pressure $f_{ck} = 27.5$ MPa (MPa)

	d(mm)	Cover depth	Uniform	non uniform		
				$\alpha=2$	$\alpha=4$	$\alpha=8$
Corner	$\phi=8$	4	1.49	1.54	0.76	0.5
		8	3.10	3.36	1.79	1.23
		16	6.29	6.87	3.93	2.91
	$\phi=16$	8	1.48	1.52	0.76	0.48
		16	3.08	3.33	1.78	1.26
		32	6.20	6.75	3.81	2.84
Middle	$\phi=8$	4	1.40	1.44	0.78	0.54
		8	2.95	3.05	1.71	1.23
		16	5.96	6.20	3.59	2.74
	$\phi=16$	8	1.37	1.40	0.78	0.52
		16	2.87	3.03	1.70	1.22
		32	5.86	6.33	3.66	2.76

짐을 알 수 있다.

3.4 철근 피복 파괴시간

철근 피복 파괴시간 결정에 사용한 철근 부식속도는 $i_{corr} = 0.05 \mu A / cm^2$ 으로 일정하다고 가정하였으며, 이를 thick wall cylinder 탄성이론의 변위 u로 치환하면 철근 피복의 파괴시간을 결정할 수 있으며 그 추정 결과는 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 알 수 있듯이, 철근의 부식 상태가 일정하지 않은(pitting corrosion) 경우의 철근 피복의 파괴시간

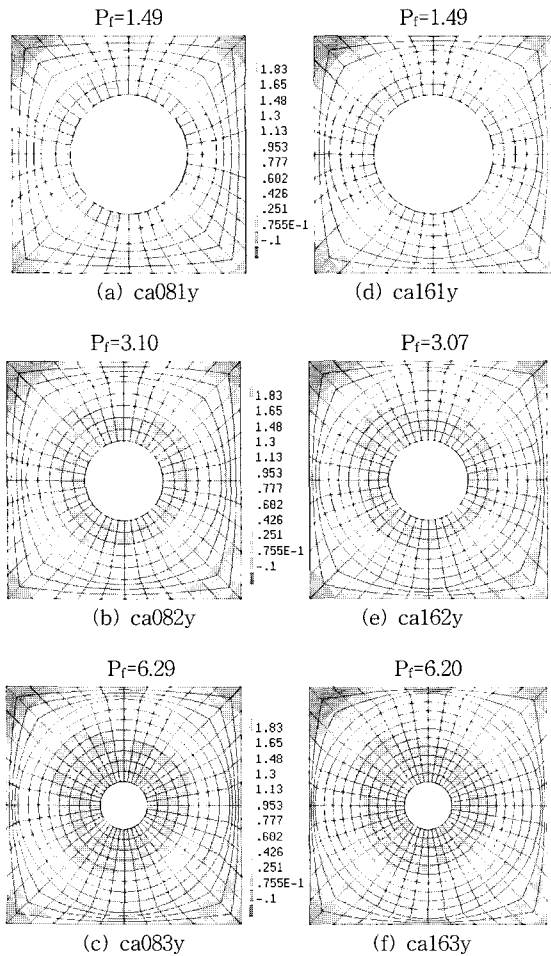


Fig. 10 Stress distribution around rebar at failure (P_f =failure pressure, MPa)

이 철근 부식이 균일하다고 가정한 경우의 최저 61% 정도로 나타남을 알 수 있다. 철근 부식속도가 큰 경우에는 철근덮개 파괴시간의 차이가 1년 정도로 실제 구조물의 수명예측에 큰 의미가 없는 것으로 생각될 수 있으나, 철근 부식속도가 크지 않은 경우에는 철근 피복 파괴시간의 추정에 큰 차이를 가져올 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 사용수명을 예측함에 있어서 사용수명을 잠복기(initiation time)와 전진기(propagation time)의 합으로 정의하는 경우, 철근 피복 파괴시점의 예측은 중요한 부분이다. 본 연구에서는 철근 피복의 파괴시간의 추정에 있어서, 철근 부식속도를 측정하거나 추정이 가능한 경우 해석적 방법으로 철근피복의 파괴시간을 예측할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 해수에 침지된 철근 콘크리트구조물의 철근 부식속도는 인공해수용액에서 실험결과로부터, 콘크리트중의 철근

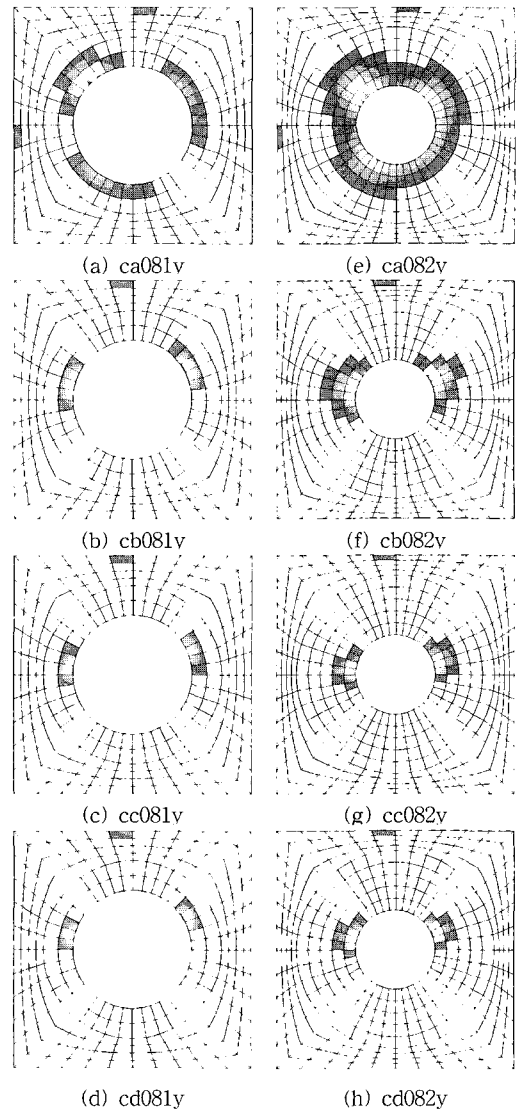


Fig. 11 Crack elements around rebar

Table 3 Cover failure time(years)

$f_{ck}=27.5$ $f_t=1.83$	d (mm)	Cover depth	Uniform	Non uniform			c/d
				$\alpha=2$	$\alpha=4$	$\alpha=8$	
Middle	$\phi=8$	4	1.08	1.09	0.85	0.77	0.5
		8	1.40	1.43	1.06	0.92	1.0
		16	2.06	2.12	1.47	1.25	2.0
	$\phi=16$	8	1.57	1.59	1.13	0.95	0.5
		16	2.19	2.28	1.53	1.26	1.0
		32	3.50	3.74	2.40	1.95	2.0

부식속도로 환산할 수 있으며, 향후 많은 실험을 통하여 그 상관관계를 규명할 수 있을 것이다.

- 2) 철근의 부식분포를 실제 현상과 유사한 국부부식으로 가정하는 것이 합리적인 철근 피복 파괴시간을 추정할 수 있다.
- 3) 철근의 부식속도를 알고 있는 경우 Thick wall cylinder 탄성이론과 유한요소해석을 이용하여 철근 피복의 파괴압력과 파괴시간을 예측할 수 있는 방법론을 제시하였다.

참고문헌

1. Abdul-Hamid, Al-Tayyib, and J., Khan, M.S., "Corrosion Rate Measurements of Reinforcing Steel in Concrete by Electrochemical Techniques", *ACI Materials Journal*, 1988, pp.172~177.
2. C. Andrade and C. Alonso, "Corrosion Rate Monitoring in the Laboratory and On-site", *Construction and Building Materials*, Vol.10, No.5, 1996, pp.315~328.
3. C. Andrade and C. Alonso, "On-site Measurements of Corrosion Rate of Concretes", *Construction and Building Materials*, Vol.15, 2001, pp.141~145.
4. E.J. Hansen and V.E. Saouma, "Numerical Simulation of Reinforced Concrete Deterioration-Part II: Steel Corrosion and Concrete Cracking," *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.3, 1999, pp.331~338.
5. G. J. Verbeck, "Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete", *ACI-SP49*, 1975, pp.21~38.
6. J. A. González, C. Andrade, C. Alonso, and S. Feliu, "Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement", *Cement and Concrete Research*, Vol.25, Issue2, February 1995, pp. 257~264.
7. H. J. Dagher and S. Kulendran, "Finite Element Modeling of Corrosion Damage in Concrete Structures", *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.6, 1992, pp.699~708.
8. H. M. Jennings and P. D. Tennis, "Model for Developing Microstructures in Portland Cement Paste", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol.77, No.12, 1994, pp.3161~3172.
9. Jones, D.A., *Principles and Preventions of Corrosion*, 2nd Ed., Prentice Hall International Limited, London, 1997.
10. Lambert, P. and Page, C. L., "Investigations of Reinforcement Corrosion. 2. Electrochemical Monitoring of Steel in Chloride-Contaminated Concrete", *Materials and Structures*, Research and Testing(Rilem, Paris), Vol.24, 1991, pp.351~358.
11. Liu, Y. and Weyer, R. E., "Modelling of Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures", *ACI Materials Journal*, Nov.-Dec., 1998, pp.675~681.
12. N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting, *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, *ASTM, STP1065*, 1990.
13. Schiessl, P., *Corrosion of Steel in Concrete*, Report of Rilem Report Technical Committee 60-CSC, Rilem, Chapman & Hall, London. 1988.
14. S. J. Williamson and L. A. Clark, "Pressure Required to Cause Cover Cracking of Concrete Due to Reinforcement Corrosion", *Magazine of Concrete research*, Vol.52, No.6, 2000, pp.455~467.
15. Tuutti, K., "Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel", Performance of Concrete in Marine Environment, SP-65, *Journal of American Concrete Institute*, Detroit, 1980, pp.223~236.
16. Tuutti, K., *Corrosion of Steel in Concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. 1982.
17. DIANA User's Manuals-Release 7, TNO Building and Construction Research, August 1998.
18. 장봉석, "염소이온 확산에 미치는 철근의 영향과 비선형 부식분포를 고려한 철근콘크리트 구조물의 사용수명 추정방법", 서울대학교 박사학위 논문, 2001.
19. 오병환, 장봉석, "비선형 부식분포를 고려한 철근덮개 파괴해석", 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, 2001, pp.1041~1044.
20. 오병환, 김기현, 장봉석, "촉진 철근 부식 방법을 이용한 부식팽창압력과 철근 덮개파괴 실험 및 해석연구", 한국구조물진단학회 가을 학술발표회 논문집, 한국구조물진단학회, 2001, pp.43~46.

요 약

본 연구에서는 염해환경에 노출되어 있는 철근콘크리트 구조물의 수명예측에 있어서 철근덮개 파괴시간 예측을 위하여, 유한요소해석을 통한 방법을 제시하였다. 또한 본 연구에서는 인공세공용액중의 철근 부식속도로부터 콘크리트 중의 철근 부식속도를 유도하는 방법을 제시하였으며, 철근 부식의 분포에 따른 철근덮개의 파괴시간을 비교하여, 철근덮개 파괴시간을 합리적으로 예측하기 위한 방법을 제시하였다. 국부부식을 고려한 경우 균일한 부식을 가정할 경우보다 최대 약 40%정도 철근덮개 파괴시간이 짧아짐을 알 수 있다. 따라서, 철근덮개의 파괴시간 예측을 위한 유한요소해석에 있어서 국부부식을 고려하는 것이 합리적인 결과를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 철근 부식, 덮개파괴, 부식속도 예측식