

철근부식에 의한 철근콘크리트골조의 구조성능분석

최 세 운^{1†}

¹대구가톨릭대학교 건축학부

Structural Performance Investigation for the Reinforced Concrete Frames Deteriorated by the Reinforcement Corrosion

Se-Woon Choi^{1†}

¹Department of Architecture, Catholic University of Daegu, Gyeongsan, 38430, Korea

Abstract

The existing research on the damage detection method for building structures has considered the damages from the excessive loadings such as the earthquake. However, the structural performance of building structures could be reduced due to the deterioration based on the chloride, carbonation during the long-term time. Thus, to effectively manage the healthiness of structures, the deterioration influences on the structures should be checked. In this study, the corrosion of rebars by the chloride is considered as the deterioration factor. To consider the structural performance reduction of the corroded rebars, the yield strength, cross-sectional area, rupture strain of rebars and the compressive strength of cover concrete based on the corrosion level are estimated. These properties of rebars and cover concrete are used for the procedure to evaluate the structural performance reduction of structural member level and the building level. The moment-curvature analysis is performed to evaluate the structural performance reduction of structural member level. Also, the eigenvalue analysis and the pushover analysis are performed to investigate the natural period and mode shape and the strength and deformation performance of buildings, respectively.

Keywords : reinforced concrete moment frame, reinforcement corrosion, deterioration of structural performance, chloride

1. 서 론

컴퓨터 성능의 발달로 인한 구조해석 기술의 향상, 전기, 통신, 전자, 기계 등 타 학문 기술과의 접목을 통한 센싱 및 구조반응 데이터처리기술 발달, 건설사고로부터 국민의 안전을 확보하고자 하는 사회적 요구증대 등과 같은 배경 속에 사회기반시설물 및 건축물의 안전도를 모니터링하고 이에 근거하여 구조물을 유지, 관리하는 구조물건전도모니터링(structural health monitoring, 이하 SHM)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Choi *et al.*, 2013; Gangone *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2009; Oh *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2015).

혈압측정, 피검사, X-ray 검사 등과 같은 수단을 통해 인

체의 건강상태를 관리하듯이, 구조물의 SHM에서는 구조물의 특성과 구조반응 등을 이용하여 구조물의 건전도 상태를 모니터링한다. 이는 만약 구조물에 이상이 있을 경우 신속하게 대처하여 물질적, 경제적 피해를 줄이고 구조물의 장수명화를 실현하고자 하는 목적이 있다.

건물에 지진, 태풍 등과 같은 외부 자극이 가해지면 변형, 응력, 진동 등과 같은 구조반응이 발생하게 된다. 만약, 재료레벨, 부재레벨, 구조물레벨에서 강도, 강성 등과 같은 역학적 특성이 변화하게 되면 동일한 외부 하중에 대해서도 다른 구조 반응이 발생하게 되며 위험도가 달라지게 된다. 이렇게 구조반응 이력데이터를 비교해서 구조물의 건전도 상태를 평가할 수 있다.

일반적으로 구조물의 건전도 상태를 평가하는 방법 중에는

[†] Corresponding author:

Tel: +82-53-850-2736; E-mail: watercloud@cu.ac.kr
Received August 24 2015; Revised September 12 2015;
Accepted September 13 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

가속도 반응을 계측하여 구조물레벨에서의 고유진동수와 모드 형상을 획득하고, 이것들의 손상 전, 후 값을 비교하는 방법이 연구되고 있다(Brownjohn *et al.*, 2011; Carden and Fanning, 2004; Hong and Kim, 2012). 이는 지진과 태풍 등과 같은 외부 요인에 의한 구조손상은 구조부재의 강성을 감소시켜 구조물의 고유진동수와 모드형상을 변화시킨다는 가정에 근거를 두고 있다.

구조물의 손상 평가(damage detection)와 관련된 기존 연구들은 대부분 과도한 하중이 작용하여 발생하는 손상에 초점을 맞추어 왔다(Hou *et al.*, 2000; Kim and Lynch, 2012; Shiradhonkar and Shrikhande, 2011). 그래서 과도한 하중이 작용하기 전과 후에 대한 구조물의 상태 정보를 시스템 식별(system identification)과 같은 기법을 사용하여 구조물의 특성을 찾고, 이를 비교하는 방법을 사용하였다.

그러나 구조물의 건전도에 영향을 미치는 인자에는 지진, 태풍 등과 같은 과도한 하중뿐만 아니라 탄성화, 염화이온 침투 등에 의한 구조재료의 노후화 등이 있을 수 있다. 이는 시간 경과에 따라 서서히 진행되기 때문에 특정 시점을 전, 후로 하여 구조물의 특성 변화를 비교하고, 이를 통해 구조물의 건전도를 평가하기에는 무리가 있다. 기존 손상평가 연구에서는 대부분 구조재료의 시간의존성을 고려하지 않고, 재령에 상관없이 구조물의 구조특성이 유지되다가 외부 하중 요인에 의해 변화가 발생한다고 가정하고 있다. 하지만, 시간에 따른 구조재료의 노후화는 구조물의 저항성능을 저하시켜 구조물의 구조위험도를 증가시키기 때문에 구조물의 건전도 평가시 이에 대한 고려가 요구된다.

이에 관한 연구에는 일반적으로 비파괴검사를 이용한 구조물의 안전진단에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다(Hong and Cho, 2007; Joh *et al.*, 2010). 안전진단 항목에는 콘크리트 압축강도추정, 철근탐사, 균열조사 등과 같이 다양한 항목이 있다. 이 중에서 염화물 침투에 따른 철근의 부식에 관한 연구는 주로 비파괴검사법을 이용한 철근부식정도를 예측하거나, 이에 따른 구조부재의 강도저하정도를 평가하는 연구가 이루어져 왔다(Lim *et al.*, 2010; Ou *et al.*, 2012).

염화물이 콘크리트 부재에 침투하여 콘크리트에 매입된 철근 표면에 다다른 염화물량이 임계수준 이상이 되면 철근은 부식하게 된다. 이는 외부하중에 대해 저항하는 철근의 단면적을 감소시켜 구조저항성능을 저하시키게 된다. 또한 철근부식은 부재의 강도저하뿐만 아니라 부재의 연성능력을 저하시킨다. 이러한 부재의 저항성능 저하는 구조물레벨의 성능저하를 초래한다.

본 연구에서는 염화물 침투에 의한 철근부식에 따른 철근콘

크리트 구조물의 구조특성 및 성능의 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 먼저 염화물의 침투에 따른 철근 부식량을 예측하는 평가식을 정리하고, 이를 이용하여 부식에 의한 철근의 구조특성(단면적, 항복강도, 탄성계수, 파단강도, 파단변형률) 및 피복콘크리트의 강도 등의 변화를 평가한다. 이러한 구조재료의 변화를 구조해석 모델링에 적용하여 철근 부식량에 따른 구조부재레벨(모멘트-곡률해석) 및 구조물레벨(푸쉬 오버해석)에서의 성능저하 정도를 평가한다. 또한 철근부식량에 따른 구조물의 고유진동수와 모드형상의 변화를 분석하기 위해 고유치해석을 수행한다. 본 연구에서는 Ghobarah 등(1999)이 제시한 3층 3경간 철근콘크리트 모멘트골조 예제를 사용하고, OpenSees를 이용하여 구조해석을 수행한다.

2. 시간 경과에 따른 재료의 구조적 특성 평가식

본 연구에서는 염화이온이 콘크리트 부재에 침투하여 철근이 부식되고 이에 따라 구조부재의 구조성능이 저하되는 시간 경과에 따른 노후화 과정을 고려한다. 철근부식에 의한 구조부재의 구조성능이 저하되는 것을 고려하기 위해, 철근부식에 의한 구조재료의 특성변화를 아래와 같이 고려한다.

2.1 시간 경과에 따른 철근부식 평가

철근부식에 의한 구조재료의 특성변화를 고려하기 위해서는 시간에 따른 철근부식량을 정의하여야 한다. 철근부식은 염화물이 콘크리트 부재에 침투하여 철근에 다다른 염화물량이 임계수준 이상이 되면 철근부식이 진행되기 시작한다. Enright와 Frangopol(1998)은 철근부식이 시작되는 시간을 정의하기 위해 식 (1)을 사용하였다.

$$T_i = \frac{X^2}{4D_c} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{C_o - C_{cr}}{C_o} \right) \right]^{-2} \quad (1)$$

여기서, T_i 는 부식이 시작되는 시간(year), X 는 콘크리트 피복두께(cm), D_c 는 염화확산계수(cm^2/year), C_o 는 콘크리트 표면의 염화물량(% weight of concrete), C_{cr} 는 철근부식을 일으키는 임계염화물의 양(% weight of concrete), $\operatorname{erf}()$ 는 에리함수이다.

철근이 부식하기 시작되면 시간에 따라 부식량은 증가하게 되며 이에 따라 철근 지름 및 단면적은 감소하게 된다. 이는 식 (2)와 (3)를 이용하여 정의할 수 있다(Stewart, 2004).

$$D(t) = D_i - 0.0116 \times i_{corr} \times (t - T_i) \quad (2)$$

$$A(t) = \begin{cases} \frac{\pi D_i^2}{4} & \text{for } t \leq T_i \\ \frac{\pi D(t)^2}{4} & \text{for } t > T_i \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $D(t)$ 는 부식 발생 후 감소된 철근 지름(mm), D_i 는 부식 발생 전 철근 지름(mm), i_{corr} 은 부식률($\mu A/cm^2$), t 는 경과시간(year), $A(t)$ 는 철근단면적이다. 식 (2)에서 0.0116은 $\mu A/cm^2$ 를 mm/year으로 단위변환하는 역할을 가진다.

2.2 철근의 구조재료 특성 변화

철근이 부식이 되면 외부하중에 저항하는 단면적이 감소할 뿐 아니라, 철근의 고유특성인 항복강도(yield strength), 파단강도(rupture strength), 탄성계수(elastic modulus), 파단변형률(rupture strain)에 관한 성능 역시 Fig. 1과 같이 감소하게 된다. 본 연구에서는 이를 고려하기 위해 Lee와 Cho(2009)가 제시한 식 (4)~(7)을 사용한다.

$$F_{cy} = (1 - 1.24 \times (\Delta_w/100)) F_{sy} \quad (4)$$

$$F_{csu} = (1 - 1.07 \times (\Delta_w/100)) F_{su} \quad (5)$$

$$E_{cs} = (1 - 0.75 \times (\Delta_w/100)) E_s \quad (6)$$

$$\epsilon_{csu} = (1 - 1.95 \times (\Delta_w/100)) \epsilon_{su} \quad (7)$$

여기서, F_{sy} 와 F_{cy} 는 부식 전, 후의 항복강도, F_{su} 와 F_{csu} 는 부식 전, 후의 파단강도, E_s 와 E_{cs} 는 부식 전, 후의 탄성계수, ϵ_{su} 와 ϵ_{csu} 는 부식 전, 후의 파단변형률, Δ_w 은 부식률(%)이다.

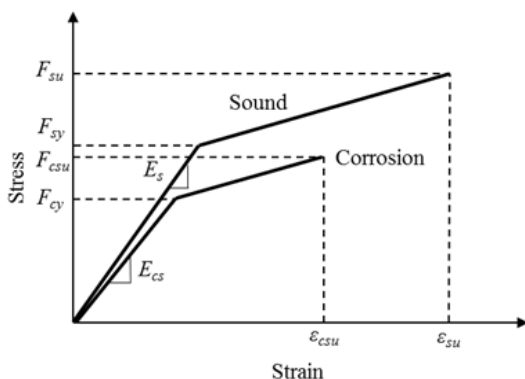


Fig. 1 Stress-strain curve of corroded reinforcements

2.3 피복 콘크리트의 강도 저하

철근이 부식되면 부피가 팽창하게 되며, 이는 철근을 감싸

고 있던 피복 콘크리트에 인장력을 발생시켜 균열이 진행되게 된다. 이는 피복 콘크리트의 강도를 저하시키는 효과를 가진다. 본 연구에서는 이를 고려하기 위해 식 (8)~(11)을 사용한다(Pitilakis *et al.*, 2014).

$$f_c^* = \frac{f_c}{1 + K\epsilon_1/\epsilon_{co}} \quad (8)$$

$$\epsilon_1 = \frac{b_f - b_o}{b_o} \quad (9)$$

$$b_f - b_o = n_{rebar} \times w_{cr} \quad (10)$$

$$w_{cr} = 2\pi(v_{rs} - 1)X \quad (11)$$

여기서, f_c^* 는 저하된 콘크리트의 압축강도, f_c 는 최대압축강도, K 은 철근의 거칠기와 지름에 관한 계수로 리브가 있는 중간 지름의 철근의 경우 0.1이 사용됨(Pitilakis *et al.*, 2014), ϵ_1 은 균열이 발생한 콘크리트의 평균 인장변형률, ϵ_{co} 은 최대 압축강도 f_c 에서의 변형률, b_o 는 부식에 의한 균열이 발생하기 전 단면 폭(width), b_f 는 부식 균열에 의해 증가된 단면 폭, n_{rebar} 는 압축단(layer under compression)에 위치하는 철근의 개수, w_{cr} 은 주어진 부식상태에서의 전체 균열 폭, v_{rs} 는 부식에 의한 부피 팽창률, X 는 철근의 부식량이며 이는 철근 반지름이 부식에 의해 줄어든 양과 동일하다. 본 연구에서 v_{rs} 의 값은 Pitilakis 등(2014)이 사용한 2를 사용한다. 식 (8)~(11)를 종합하면, 철근 부식에 의한 균열은 피복 콘크리트의 압축강도 저하로 고려할 수 있으며, 이는 철근의 부식정도 X 와 가장 밀접한 관계를 가진다.

3. 예제 적용

3.1 예제 개요

본 연구에서는 Ghobarah 등(1999)이 제시한 3층 3경간 철근콘크리트 모멘트골조 예제를 사용한다. 예제 구조물의 치수와 단면정보는 Fig. 2와 같다. 이는 내진설계가 고려되기 전인 1963 ACI 코드에 따라 중력하중에 기초하여 설계되어진 구조물이다. 따라서 이는 연성능력이 부족하다.

본 연구에서 가정한 철근의 항복강도(F_{sy}), 탄성계수(E_s), 파단강도(F_{su}), 파단변형률(ϵ_{su}), 변형경화율은 각각 300 MPa, 200,000MPa, 317MPa, 0.03이다. 콘크리트의 압축강도와 압축강도에서의 변형률은 각각 2MPa, 0.002으로 가정한다.

본 연구에서는 철근콘크리트골조의 구조특성에 대한 철근

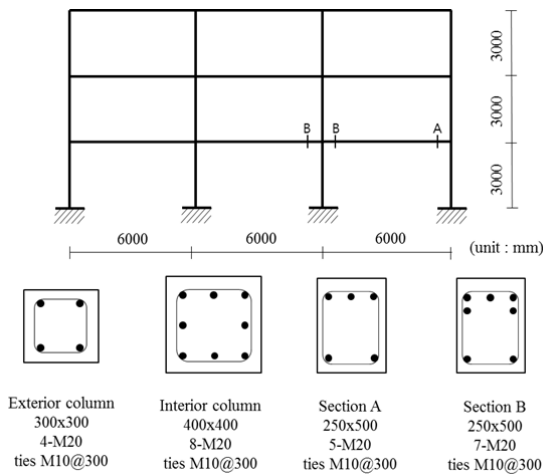


Fig. 2 Dimensions and details of an example structure

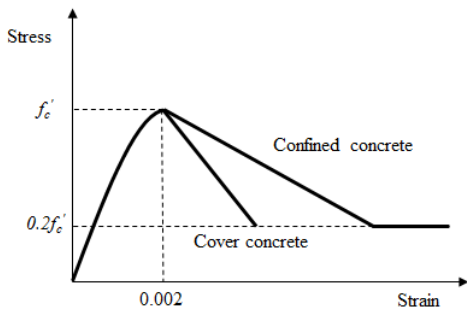


Fig. 3 Stress-strain curves of concrete (Park and Park, 1975)

부식의 영향을 파악하기 위해, 모멘트-곡률해석, 고유치해석, 비선형 정적해석 등을 수행한다. 이를 위해 골조의 지진해석 연구분야에서 주로 사용되고 있는 OpenSees를 사용하였다. 먼저 고유치 해석을 위해서 지량은 질점에 집중되어 있다고 가정하였다. 그리고 모멘트-곡률해석을 위해 철근재료는 이 선형모델인 Steel01을 사용하였으며, 콘크리트재료는 Fig. 3과 같은 Park과 Park(1975)에서 제시된 모델을 사용하기 위해 Concrete01 모델을 사용하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있는 것처럼 Park과 Park(1975)의 모델은 구속된 콘크리트와 커버 콘크리트의 재료거동을 분리하도록 구분하고 있다. fiber 명령어를 통해 단면을 작은 요소 나누어 모델링을 하도록 하였다.

구조물레벨의 구조성능을 평가하기 위해 보-기둥 요소는 beamWithhinges를 이용하였다. 이는 요소 중앙은 탄성거동을 하고, 요소 단부에서만 소성거동이 집중하도록 하는 원리를 가진다. 소성힌지가 발생하는 구간길이는 부재 깊이의 1/2로 가정하며, 해당 구간에는 모멘트-곡률해석에서 사용한 비선형거동을 하는 단면정보를 입력하였다. 비선형 정적해석을 수행하기 위해 역삼각형분포의 횡하중을 적용하였으며, 변위제어를 실시하도록 하였다. 그리고 P-delta 및 다이어프램 효과는 비선형 정적해석 과정에서 고려된다.

한편, 2.1절에서 기술한 수식을 이용하여 철근의 부식량을 평가하기 위해 Table 1과 같은 영향인자들의 확률값을 사용한다. 철근부식은 외기와 접하는 외부기둥에서 균등하게 발생한다고 가정한다.

4. 시간 경과에 따른 구조성능평가

2장에서 제시한 철근부식에 관한 예측식과 Table 1을 이용한 시물레이션 결과, 부식이 발생하는 평균 시간(T_f)은 9.70년이며 시간 경과에 따른 부식에 의한 외부기둥의 주근의 지름과 단면적의 변화는 Fig. 4와 같다. 부식이 발생한 이후부터 평균적으로 0.0116mm/year의 속도 부식이 진행된다. 목표수명이 50년이라고 가정하면, 50년 후에는 주근 단면적이 약 9.06% 감소하는 것으로 나타났다.

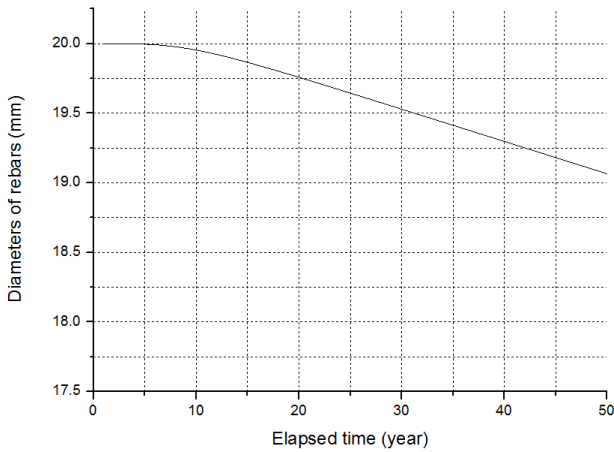
철근부식은 철근재료의 구조특성을 변화시킨다. 식 (4)~(7)을 이용하여 50년 후 철근부식에 의한 철근재료의 구조특성(항복강도, 탄성계수, 파단강도, 파단변형률, 연성률) 변화를 Table 2에 정리하였다. 항복강도와 파단강도는 10% 내외로 감소된 반면에 파단변형률과 연성률은 15% 내외로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 부식된 구조물의 구조성능 평가시 강도뿐만 아니라 변형성능 역시 검토되어야 함을 의미한다.

식 (8)~(11)에 따라 계산된 부식에 의해 저하되는 피복 콘크리트의 압축강도는 10.61MPa으로 약 50.53%로 감소하는 것으로 나타났다.

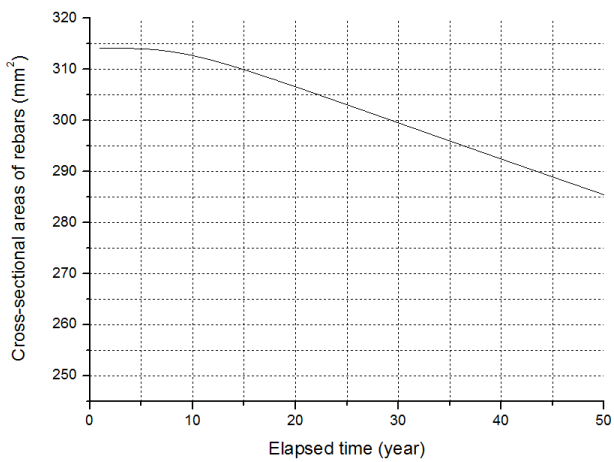
부식 전, 후 재료레벨의 구조특성 변화 값을 외부기둥 부재의 단면 정보에 적용하여 모멘트-곡률해석을 수행하였다.

Table 1 Statistics of deterioration parameters

Parameter	Distribution	Mean value	Coefficient of variation	Unit	Reference
Diffusion coefficient(D_c)	Lognormal	1.29	0.1	cm ² /year	Ghosh and Padgett(2010)
Surface chloride concentration(C_o)	Lognormal	0.1	0.1	% weight of concrete	Ghosh and Padgett(2010)
Critical chloride concentration(C_{cr})	Lognormal	0.04	0.1	% weight of concrete	Ghosh and Padgett(2010)
Cover depth(X)	Lognormal	4	0.2	cm	Chiu and Chi(2013)
Corrosion rate(i_{corr})	Normal	1.0	0.2	μA/cm ²	Kim <i>et al.</i> (2004)



(a) Diameters of rebars



(b) Cross-sectional areas of rebars

Fig. 4 Diameters and cross-sectional areas of corroded rebars

Table 2 Material properties of rebars

Type	Sound	Corroded	Ratio
Yield strength(MPa)	300	266.30	88.77%
Elastic modulus(MPa)	200,000	186,410	93.21%
Rupture strength(MPa)	317	286.27	90.31%
Rupture strain	0.01	0.0082	82.33%
Ductility	6.67	5.76	86.45%

모멘트-곡률해석의 종료는 철근이 파단변형률에 다다른 시점으로 가정하였다. Fig. 5와 같이 강도와 연성이 저하되는 것을 나타냈다. 강도와 연성은 각각 19.98%와 20.69%씩 감소되는 것으로 나타났다. 이는 염화물에 의한 콘크리트 및 철근의 열화로 인하여 부재의 취성파괴 위험성이 증가하였음을 의미한다.

모멘트-곡률해석을 통해 위부기둥의 강성, 강도, 연성이 감소한 것을 확인하였다. 부재의 이러한 변화는 구조물레벨의 구조특성 및 거동에 영향을 미친다. 이를 확인하기 위해 부식에 의한 재료모델의 특성 변화값을 구조물 모델링과정에

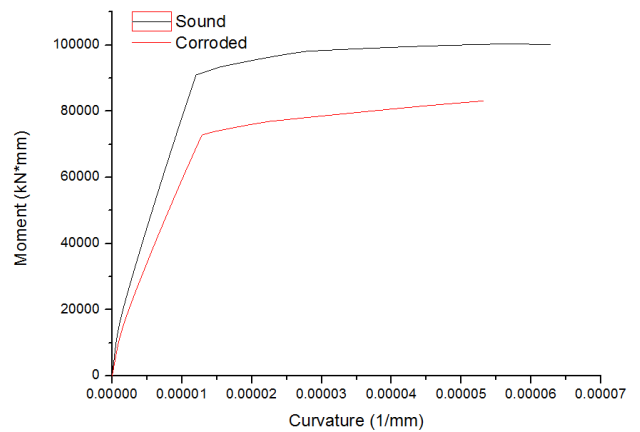


Fig. 5 Moment-curvature curve of the external column

적용하여 구조물의 고유치해석과 비선형 정적해석을 수행하였다. 고유치해석을 수행한 결과, Table 3과 같이 1차, 2차, 3차 고유주기가 각각 1.26%, 1.41%, 1.51% 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 모멘트-곡률해석에서 확인한 것처럼 위부기둥 부재의 강성은 부식에 의해 감소하지만, 구조물의 질량은 변함이 없기 때문이다. 이를 통해 염화물에 의한 철근 부식은 구조물의 고유진동수에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 한편, Table 4에 고유모드의 변화를 정리하였다. 부식 전, 후의 모드형상 유사성을 확인하기 위해 Modal Assurance Criteria(MAC)을 사용하였다. MAC 값은 식 (6)을 이용하여 구한다.

$$MAC_{ij} = \frac{[\{x_i\}^T \{\phi_j\}]^2}{[\{x_i\}^T \{x_j\}][\{\phi_j\}^T \{\phi_j\}]} \quad (12)$$

Table 3 Comparison of natural periods

	Natural period(sec)		
	1st	2nd	3rd
Sound	0.598 sec	0.190 sec	0.112 sec
Corroded	0.606 sec	0.192 sec	0.114 sec
Ratio	101.26 %	101.41 %	101.51 %

Table 4 Comparison of mode shapes

Mode shapes		Floor		
		2nd	3rd	4th
1st	Sound	0.3404	0.7497	1.0000
	Corroded	0.3411	0.7500	1.0000
	MAC	1.0000		
2nd	Sound	-1.1922	-0.7928	1.0000
	Corroded	-1.1914	-0.7917	1.0000
	MAC	1.0000		
3rd	Sound	2.4734	-2.4574	1.0000
	Corroded	2.4736	-2.4585	1.0000
	MAC	1.0000		

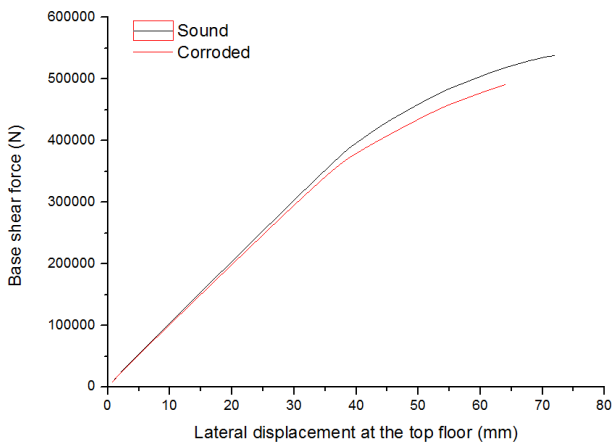


Fig. 6 Comparison of pushover curves

여기서, x_i 는 i 번째 기준모드형상을 의미하여, ϕ_j 는 j 번째 비교모드형상을 의미한다. MAC값은 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 높은 상관관계를 의미한다. 고유주기와 다르게 모드형상은 부식에 의해 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 부식에 의한 구조물의 동특성 변화에 관한 연구결과는 구조물의 시스템식별, 손상평가 등의 기법을 정하고 운영하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

구조물의 구조거동의 변화를 확인하기 위해 비선형 정적해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 비선형 정적해석의 종료시점은 철근이 파단되는 시점으로 가정하였다. 부식 여부와는 상관없이 1층 외부기둥에서 최초로 철근 파단이 일어나는 것으로 나타났다. 부식에 의해 구조물의 강성, 강도, 연성이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 부식에 의해 파단시 강도는 538.1kN에서 491.2kN으로, 파단 시 횡변위는 72.00mm에서 64.08mm으로 감소하는 것으로 나타났다. 파단에 대한 강도와 변형 저항능력이 부식에 의해 11.00%, 8.72%으로 감소하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 염화물 침투에 의한 철근부식에 따른 철근콘크리트 구조물의 구조 특성 및 성능의 영향을 분석하였다. 이를 위해 3층 철근콘크리트골조 예제를 설정하였다. 이를 바탕으로 해서 먼저 염화물의 침투에 따른 철근부식량을 예측하였다. 목표수명을 50년이라고 가정할 때, 50년 후에는 철근의 지름은 약 0.93mm 감소되었다. 그리고 철근의 강도와 연성률은 각각 10%와 15% 내외에서 감소되는 것으로 나타났다. 한편, 피복두께의 콘크리트강도는 부식에 의한 균열로 인해 10.61MPa(49.47% 감소)으로 감소되는 것으로

나타났다.

이러한 구조재료의 특성변화는 부재레벨 및 구조물레벨에서의 구조성능에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 모멘트-곡률 해석을 통해 외부기둥의 강도와 연성이 각각 19.98%, 20.69%씩 저하되는 되었으며, 이는 구조물레벨에서 강도와 변형 저항능력이 부식에 의해 11.00%, 8.72%으로 감소되는 결과로 이어졌다.

한편, 부식에 의한 기둥의 강성저하로 인해 구조물의 1차, 2차, 3차 고유주기 모두, 1.26~1.51% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 모드형상은 MAC지수가 1.00으로 나타날 정도 매우 유사한 것으로 나타났다. 이는 부식에 의해 노후된 건물에 가속도 기반의 시스템식별이나 손상평가기법을 적용한다면 고유모드형상을 이용한 지표로는 부식에 의한 손상을 찾기 어렵다는 것을 나타낸다. 고유주기 역시 1%대의 변화가 나타났지만, 이는 계측에러, 평가기법의 한계 등을 고려하면 이 역시 부식에 의한 구조물의 건전성을 판단하는 지표로 활용하기에는 어렵다고 판단할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A1A2059874).

References

Brownjohn, J.M.W., Stefano, A.D., Xu, Y.L., Wenzel, H., Aktan, A.E. (2011) Vibration-based Monitoring of Civil Infrastructure: Challenges and Successes, *J. Civil Struct. Health Monit.*, 1(1-3), pp.79~95.

Carden, E., Fanning, P. (2004) Vibration Based Condition Monitoring: A Review, *Struct. Health Monit.*, 3(4), pp.355-377.

Chiu, C.K., Chi, K.N. (2013) Analysis of Lifetime Losses of Low-rise Reinforced Concrete Buildings Attacked by Corrosion and Earthquakes using A Novel Method, *Struct. & Infrastruct. Eng.*, 9(12), pp.1225-1239.

Choi, S.W., Park, K., Kim, Y., Park, H.S. (2013) A Numerical Study on the Strain Based Monitoring Method for Lateral Structural Response of Buildings using FBG Sensors, *J. Comput. Struct. Eng. Ist. Korea*, 26(4), pp.263~269.

Enright, M.P., Frangopol, D.M. (1998) Probabilistic

- Analysis of Resistance Degradation of Reinforced Concrete Bridge Beams under Corrosion, *Eng. Struct.*, 20(11), pp.960~971.
- Gangone, M.V., Whelan, M.J., Janoyan, K.D.** (2011) Wireless Monitoring of a Multispan Bridge Superstructure for Diagnostic Load Testing and System Identification, *Computer-Aided Civil & Infrastruct. Eng.*, 26(7), pp.560~579.
- Ghosh, J., Padgett, J.E.** (2010) Aging Considerations in the Development of Time-Dependent Seismic Fragility Curves, *J. Struct. Eng.*, 136(12), pp.1497~1511.
- Ghobarah, A., Aziz, T., Abou-Elfath, H.** (1999) Softening Effects on The Seismic Response of Non-Ductile Concrete Frames, *J. Earthq. Eng.*, 3(1), pp.59~81.
- Hong, D.S., Kim, J.T.** (2012) Vibration-based Damage Monitoring Scheme of Steel Girder Bolt-Connection Member by using Wireless Acceleration Sensor Node, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(1), pp.81~89.
- Hong, S.U., Cho, Y.S.** (2007) A Study of the Structural Internal Assessment of Concrete Slab Using the Ground Penetrating Radar Exploration, *J. Archit. Inst. Korea (Structural Division)*, 23(10), pp.51~58.
- Hou, Z., Noori, M., Amand R.St.** (2000) Wavelet-Based Approach for Structural Damage Detection, *J. Eng. Mech.*, 126(7), pp.677~683.
- Joh, S.H., Lim, Y.C., Ismail, M., Lee, H.S.** (2010) Fundamental Study on Developing Embedded Mini-Sensor for Nondestructive Diagnosis Corrosion of Rebar, *J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp.*, 14(6), pp.179~187.
- Kim, H.K., Hong, Y.K., Hong, G.S.** (2004) Time Dependent Reliability-Based Assessment for the Reinforced Concrete Beams Using the Resistance Degradation Model, *J. Archit. Inst. Korea (Structural Division)*, 20(2), pp.23~30.
- Kim, J., Lynch, J.P.** (2012) Subspace System Identification of Support Excited Structures-Part II: Gray-Box Interpretations and Damage Detection, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 41(15), pp.2253~2271.
- Kim, J.Y., Yu, E., Kim, D.Y., Kim, S.D.** (2009) Calibration of Analytical Models to Assess Wind-induced Acceleration Responses of Tall Buildings in Serviceability Level, *Eng. Struct.*, 31(9), pp.2086~2096.
- Lee, H.S., Cho, Y.S.** (2009) Evaluation of the Mechanical Properties of Steel Reinforcement Embedded in Concrete Specimen as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion, *Int. J. Fract.*, 157, pp.81-88.
- Lim, Y.C., Noguchi, T., Shin, S.W.** (2010) Corrosion Evaluation by Estimating the Surface Resistivity of Reinforcing Bar, *J. Advan. Concr. Tech.*, 8(2), pp.113-119.
- Mazzoni, S., Mckenna, F., Fenves, G.L.** (2006) OpenSees Command Language Manual, (<http://opensees.berkeley.edu/index.php>)
- Oh, B.K., Choi, S.W., Kim, Y., Cho, T.J., Park, H.S.** (2014) An Analytical Study on System Identification of Steel Beam Structure for Buildings based on Modified Genetic Algorithm, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Koera*, 27(4), pp.231~238.
- Ou, Y.C., Tsai, L.L., Chen H.H.** (2012) Cyclic Performance of Large-Scale Corroded Reinforced Concrete Beams, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 41, pp.593-604.
- Park, J., Choun, Y.S., Choi, I.K.** (2011) Sensitivity Analysis of Parameters Affecting Seismic Response for RC Shear Wall with Age-Related Degradation, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(4), pp.391~398.
- Park, R., Park, T.** Reinforced Concrete Structures, Wiley, 1975.
- Park, S.W., Park, H.S., Kim, J.H., Adeli, H.** (2015) 3D Displacement Measurement Model for Health Monitoring of Structures using a Motion Capture System, *Measurement*, 59, pp.352~362.
- Pitilakis, K.D., Karapetrou, S.T., Fotopoulou, S.D.** (2014) Consideration of Aging and SSI Effects on Seismic Vulnerability Assessment of RC Buildings, *Bull. Earthq. Eng.*, 12(4), pp.1755~1776.
- Shiradhonkar, S.R., Shrikhande, M.** (2011) Seismic Damage Detection in A Building Frame Via Finite Element Model Updating, *Comput. & Struct.*, 89, pp.2425~2438.
- Stewart, M.G.** (2004) Spatial Variability of Pitting Corrosion and Its Influence on Structural Fragility and Reliability of RC Beams in Flexure, *Struct. Saf.*, 26, pp.453~470.

요 지

기존 구조물의 손상평가에 관한 연구는 지진 등과 같은 과도한 하중에 의한 손상을 고려하였다. 그러나 구조물은 과도한 하중없이도 장기간의 시간에 따라 염화물, 탄성화 등과 같은 이유로 노후화가 진행되어 구조성능이 저하될 수 있다. 그래서 구조물의 건전도를 효과적으로 관리하기 위해서는 노후화에 의한 구조성능 저하도 검토되어야 한다. 본 연구에서는 염화물에 의한 철근의 부식을 노후화 요인으로 고려한다. 철근부식에 의한 재료의 구조성능 저하를 고려하기 위해 부식정도에 따른 철근의 단면적, 항복강도, 파단변형률, 피복 콘크리트 강도 등을 예측한다. 이를 구조모델링에 적용하여 구조부재 및 구조물의 구조성능 저하를 분석한다. 구조부재의 구조성능을 분석하기 위해 모멘트-곡률 해석을 수행한다. 구조물 레벨의 구조성능을 고려하기 위해, 고유치해석을 통한 고유주기와 모드형상을 분석한다. 또한 비선형 정적해석을 통해 구조물의 강도와 변형성능을 분석한다.

핵심용어 : 철근콘크리트골조, 철근부식, 노후화, 염화물