

재료의 구성모델에 따른 철근콘크리트 골조의 비선형 동적거동 특성 차이에 관한 연구

Nonlinear Dynamic Analysis of RC Frames Based on Constitutive Models of Constituent Materials

허 영 애¹⁾ 강 현 구^{2)*}
YeongAe Heo Thomas H.-K. Kang

Abstract

Constitutive modeling of constituent materials is very important for reinforced concrete (RC) frames. Cyclic constitutive behavior of unconfined concrete, confined concrete and reinforcing steel should be well defined in fiber-based discretization of RC sections. This study performs nonlinear dynamic analyses of RC frame structures to investigate the sensitivity of seismic behavior of such frames to different constitutive models of constituent materials. The study specifically attempts to examine confinement effects in concrete modeling and degrading effects in steel modeling, which substantially affects the monotonic, cyclic and seismic responses of RC members and frames. Based on the system level analysis, it is shown that the response of non-ductile frames is less sensitive to confined concrete models while the modeling of reinforcing steel is quite influential to the inelastic response of both non-ductile and ductile frames.

Keywords : Nonlinear dynamic analysis, Constitutive models, Constituent materials, Concrete, Reinforcing steel, Seismic behavior

1. 서 론

1.1 연구의 목적

철근콘크리트 구성요소에 대한 비탄성 거동 모델 개발은 철근콘크리트 구조물에 대한 성능기반 내진평가의 정밀도 향상에 있어 매우 중요한 요소이다. 초기의 철근콘크리트 구조물에 대한 비선형 지진응답 예측 모델은 부재의 힘-변형 이력 관계를 적용한 현상 모델을 기반으로 하여 왔고, 최근에는 섬유단면 (fiber-section) 해석법과 같은 컴퓨터 기반 방법론의 개발로 구조물의 비선형 응답을 더 정밀하게 구현하는 모델링 기법이 가능해졌다 (Kang and Rha, 2009; Yang et al., 2013). 이러한 컴퓨터 기반 해석에 기초한 구조 응답의 신뢰도 향상을 위해 다음의 두 가지 요소를 고려해야 한다. 1) 재료의 거동에 대한 구성모델의 정확성; 2) 요소의 변형 해석을 위한 단면의 분할 개수. 후자는 본 연구의 범위에

서 벗어나며, 요구 지진 하중에 대한 이력 모델의 민감도를 연구한 사례 (Lee et al., 1999; Riddell et al., 2002)가 이미 있다. 그러나, 다른 구성모델을 적용하여 분할 단면 기반의 요소 모델을 적용한 비선형 해석 연구는 매우 드물다. 이에 본 연구에서는 지진과 같은 불규칙 반복 하중에 대한 철근콘크리트 구조물의 비선형 동적응답을 예측함에 있어 구성모델의 특성에 따른 민감도를 고찰하고자 한다.

1.2 연구 범위 및 절차

철근콘크리트 단면은 비구속 콘크리트, 황구속 콘크리트, 보강근으로 구성된다. 본 논문의 주요 목적은 분할 단면 기반 요소 해석을 통하여 콘크리트 구성모델의 특성에 따른 민감도를 파악하는 것이므로 보강근에 대한 모델의 특성에 대한 연구는 제외한다. 단, 전단 저항력과 구속을 위한 횡보강 철근에 대해서는 콘크리트 핵심부 (코어)의 응력-변형 응답

1) 정희원, 삼성중공업 조선해양연구소 책임연구원
2) 정희원, 서울대학교 건축학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : tkang@snu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

을 수정함으로써 그 특성을 암시적으로 고려한다.

콘크리트 구조물의 비선형 응답 해석에 대한 콘크리트 구성모델의 민감도 및 중요성을 평가하기 위해 시스템 해석을 수행하였다. 강진 지역의 내진 요구사항을 충분히 반영하여 연성으로 설계한 12층 철근콘크리트 특수모멘트골조와 중력 하중 기반으로 설계된 12층 철근콘크리트 골조를 비교하였다.

두 가지 민감도 해석을 위해 콘크리트 구성모델의 영향을 파악하기 위해 인장강도를 고려한 콘크리트 구성모델과 그렇지 않은 모델을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 또한 콘크리트가 구속된 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 그 응답 차를 비교하였다. 콘크리트 구속 모델은 Mander et al. (1988) 모델과 Hoshikuma et al. (1997) 모델 두 가지를 적용하였다. 모든 구조 해석은 캘리포니아주립대를 중심으로 개발된 소스 공개 코드인 OpenSees (2012)를 이용하여 수행하였다. 2장에서 설명하는 각 구성모델은 비선형 구조해석 프로그램인 OpenSees에서 구현 가능한 모델들이다.

2. 구성모델

2.1 콘크리트 구성모델

구속 혹은 비구속 콘크리트 압축부의 응력-변형 곡선은 Fig. 1과 같이 상승 구간과 하강 구간으로 표현된다. 식 (1)과 같이 표현된 응력-변형 곡선의 상승 구간은 Sargin (1971)이 제안하였다.

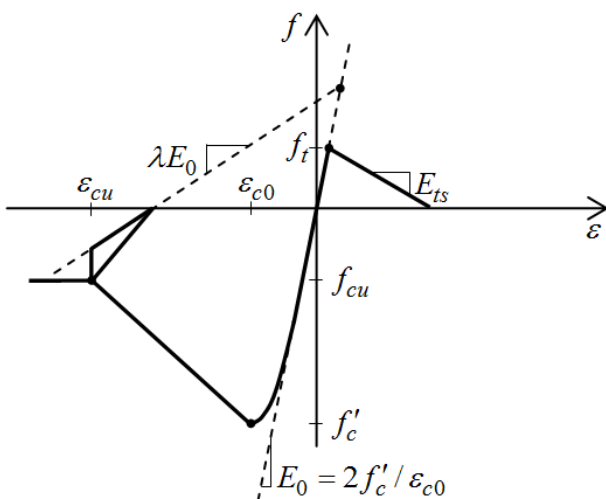


Fig. 1 Stress-strain relation of unconfined concrete (OpenSees, 2012)

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{k_a \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} + (k_b - 1) \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2}{1.0 + (k_a - 2) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} + k_b \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2} \quad (1)$$

여기서 f'_{cc} , ϵ_c 는 구속 콘크리트의 압축강도와 이에 상응하는 변형률을 각각 나타내고, f'_{co} , ϵ_{co} 는 상응하는 비구속 콘크리트의 압축강도와 변형률을 각각 나타내며, k_a , k_b 는 재료변수로서, 본 논문에서는 Hognestad (1951) 모델에 따라 $k_a = 2$, $k_b = 0$ 을 적용하였다.

2.2 콘크리트 구속모델

횡보강 철근의 양과 배열 형태에 관계된 주요 변수의 함수의 형태로 콘크리트 응력-변형 거동을 파악하기 위해 많은 연구가 수행되어 왔다. 횡보강근으로 구속된 기둥의 강성은 횡보강근의 응력 상태와 코어 콘크리트의 횡응력 분포를 고려하여 수치모델화하고, 일부 문헌에서는 추가적인 고려사항을 적용하기도 한다. 이러한 간접적인 구속력이 콘크리트의 강성의 특성에 반영되어 왔다. 본 논문에서는 구속 콘크리트의 강성을 예측하기 위해 가장 널리 참조되는 Mander et al. (1988) 모델을 채택하였다. Mander et al. (1998)의 구속 콘크리트 모델은 다음 식과 같다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_L}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_L}{f'_{co}} - 1.254 \quad (2)$$

여기서 f_L 은 유효 횡구속 응력을 나타내고, 다른 계수들은 식 (1)에서 정의한 바와 같다. 또한 Hoshikuma et al. (1997)이 다음과 같이 다항식 형태의 구속 콘크리트 모델을 제시하였다.

$$f_c = C_1 \epsilon_c^n + C_2 \epsilon_c + C_3 \quad (3)$$

이 때 $\epsilon_c = 0$, $\epsilon_c = \epsilon_{cc}$ 에서의 응력과 탄성계수에 대한 네 가지 경계조건을 적용하여 구한 상승구간의 식은 다음과 같다.

$$f_c = E_c \varepsilon_c \left[1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right] \quad (4)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - f'_c} \quad (5)$$

여기서 ε_{cc} 에서의 콘크리트의 최대 구속 압축강도에서의 변형률을 나타낸다. 하강구간은 일반적으로 파단 변형률과 잔여 응력의 개념을 적용한 선형 모델을 따른다. Hoshikuma et al. (1997) 모델에서 압축부 응력-변형선도의 하강구간은 다음과 같은 직선으로 나타낸다.

$$f_c = f_{cc} + E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (6)$$

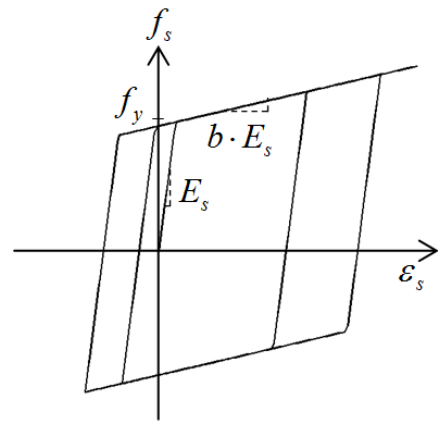
$$E_{des} = 11.2 \frac{f_{co}^2}{\rho_s \cdot f_{yh}} \quad (7)$$

여기서 ρ_s 는 체적 구속비이고, f_{yh} 는 구속근의 항복 강도이다.

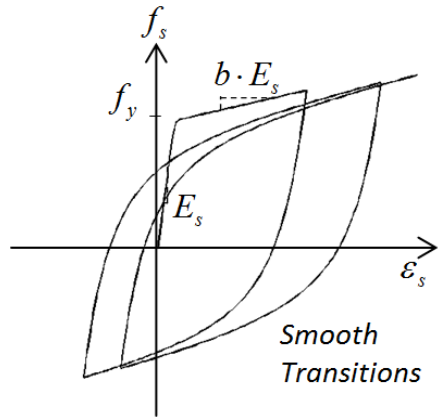
Mander et al. (1998)과 Hoshikuma et al. (1997)이 제안한 콘크리트 구속모델은 부재나 시스템의 응력-변형 응답에 있어 현저한 차이를 보인다. 따라서 본 논문에서 이 두 구속 모델을 이용하여 구조 시스템 응답에 대한 콘크리트 구성모델의 영향을 비교·분석하고자 한다.

2.3 보강근 구성모델

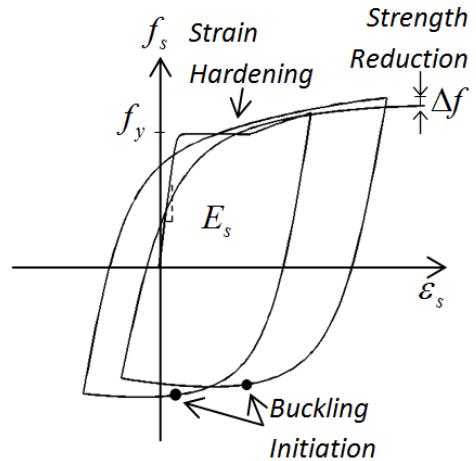
철근콘크리트 구조물의 비선형 모델링에 있어 보강근에 대한 기존 모델은 상대적으로 적었다. 주보강근에 대한 응력-변형 응답을 표현하는 데는 전형적으로 완전탄소성 (elastic-perfectly-plastic)이나 이선형 모델이 사용된다. Fig. 2(a)에 도식한 바와 같이 단순 이선형 모델은 Steel 01로 표현되고, Fig. 2(b)와 같이 변곡구간을 개선하고 등방성 경화 특성을 반영한 이선형 모델은 Steel 02로 표현되며, 응력 감쇠 특성 등과 같이 콘크리트 구조물의 모델링에 있어서 중요한 특성들을 포함한 고급 모델은 Fig. 2(c)와 같은 Reinforcing Steel 혹은 RS 모델로 표현된다. 이 세 가지 모델은 OpenSees (2012)에서 실행할 수 있다. Steel 01은 탄성계수 E_s 와 항복 응력 f_y 으로 특성이 결정되고, 변형률 경화 계수인 b 로 항복 응력 이후의 거동이 결정된다. Steel 02는 반복하중하에서 등



(a) Bi-linear model (Steel 01)



(b) Bi-linear model (Steel 02): Improved smooth transition and isotropic hardening



(c) Reinforcing steel model (Reinforcing Steel: RS)

Fig. 2 Cyclic stress-strain relations of reinforcing steel

방성 경화 특성을 반영함과 동시에 Giuffre-Menegotto-Pinto (1973) 모델을 이용하여 선형구간 사이를 부드럽게 연결하도록 한 이선형 모델의 변형모델이다.

한편, RS 모델은 좌굴을 포함한 복잡한 응력 감쇠 효과를

구현하기 위한 특성을 반영한 고급 모델이다. RS 모델의 중심 곡선은 Chang and Mander (1994) 모델을 기반으로 개발되었다. 항복응력 f_y 까지는 탄성계수 E_s 에 따라 선형 거동하고, 그 이후 항복 평탄 구간이 나타나며, ϵ_{sh} 에서 변형 경화가 시작된다. 이 구간의 곡률은 ϵ_{sh} 에서 접선 탄성계수인 E_{sh} 에 의해 결정된다. 응력 저감 계수인 f_{SR} 을 이용하여 항복강도와 극한강도에 대한 새로운 한계치를 산출함으로써 반복 하중 동안 재하, 비재하, 재 재하 각각의 경로에 대한 거동을 제어한다. 이 응력 저감 계수는 널리 알려진 Coffin-Manson 계수에 의해 산출할 수 있다. 본 논문에서 반복 저감 계수는 Kunnath et al. (2008)이 수행한 기초 계측 연구를 참고한다.

3. 구조 응답 해석

이 장에서는 두 개의 철근콘크리트 골조 시스템에 대한 응답 해석을 수행한 결과를 설명한다.

3.1 해석 모델

Fig. 3에 나타나 있는 12층 일반 철근콘크리트 모멘트골조가 비선형 동적해석의 대상으로 채택되었다. 골조에 사용된 층간높이, 경간, 기동축력 그리고 재료의 물성 등은 Table 1에 나타나 있다. 한 개의 시스템은 특수모멘트골조의 상세를 가지는 (Ductile), 강지진대에 위치한 시스템이고, 다른 한 개의 시스템은 그렇지 못한, 비연성적인 (Non-Ductile) 상세를 가지는 시스템이다. 이 두 시스템의 부재치수 및 철근량 등의 단면 상세는 Tables 2와 3에 각각 나타나 있다. 해석의 목적에 충실하기 위해 설계모멘트 저항을 위한 보의 상부근과 하부근은 같은 양으로 결정하였다. 이러한 두 가지 다른

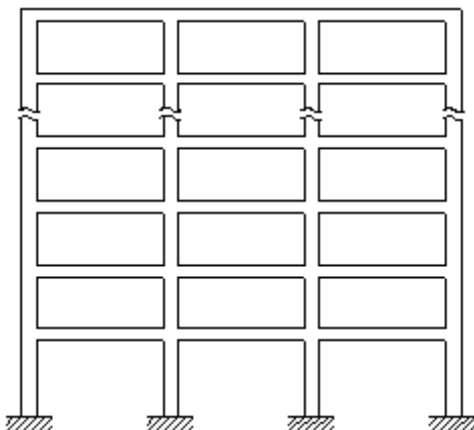


Fig. 3 Two-dimensional 12-story beam-column frame model

상세를 가지는 골조 시스템은 각 재료의 구성모델에 대한 동적응답의 민감도를 분석하기에 적합하며, 매우 실제적인 모델이라 할 수 있다.

비선형 동적해석에 사용된 8개의 다른 지진파는 Tables 4와 5에 나타나 있는데, 최대지반 가속도 (PGA)와 더불어 각

Table 1 Dimensional and material properties used

12 story RC frame (Unit: mm, MPa)		
Story height	1	4500.00
	2~12	3600.00
Bay distance	All	7000.00
$P/(A_g \cdot f'_c)$	1	0.40
	2~12	0.033
Clear cover	All	50.80
f'_c	All	28.00
f_y	Longitudinal	415.00
	Transverse	415.00

Table 2 Member sectional and reinforcing details of "Ductile" reinforced concrete frame

Story		Column	Beam
1	Size	965.2×965.2	965.2×863.6
	Longit. reinf.	24-35.81dia	18-32.26dia
	Transv. reinf.	12.7dia@101.6	9.53dia@228.6
	ndt-x	5	4
	ndt-y	5	4
2~4	Size	965.2×965.2	965.2×863.6
	Longit. reinf.	24-35.81dia	20-32.26dia
	Transv. reinf.	12.7dia@101.6	9.53dia@228.6
	ndt-x	5	4
	ndt-y	5	4
5~7	Size	863.6×863.6	863.6×812.8
	Longit. reinf.	20-32.26dia	18-32.26dia
	Transv. reinf.	12.7dia@101.6	9.53dia@215.9
	ndt-x	5	4
	ndt-y	5	4
8~10	Size	812.8×812.8	812.8×812.8
	Longit. reinf.	16-32.26dia	18-28.65dia
	Transv. reinf.	12.7dia@101.6	9.53dia@203.2
	ndt-x	4	4
	ndt-y	4	4
11~12	Size	711.2×711.2	711.2×711.2
	Longit. reinf.	16-25.4dia	20-25.4dia
	Transv. reinf.	9.53dia@101.6	9.53dia@177.8
	ndt-x	4	4
	ndt-y	4	4

ndt-x: number of transverse rebar in x direction

ndt-y: number of transverse rebar in y direction

Table 3 Member sectional and reinforcing details of “Non-ductile” reinforced concrete frame

Story		Column	Beam
1	Size	762×762	762×660.4
	Longit. reinf.	16-32.26dia	16-28.65dia
	Transv. reinf.	9.53dia@457.2	12.7dia@330.2
	ndt-x	3	2
	ndt-y	3	2
2~4	Size	711.2×711.2	711.2×660.4
	Longit. reinf.	16-32.26dia	16-28.65dia
	Transv. reinf.	9.53dia@457.2	12.7dia@330.2
	ndt-x	3	2
	ndt-y	3	2
5~7	Size	660.4×660.4	660.4×609.6
	Longit. reinf.	16-28.65dia	20-25.4dia
	Transv. reinf.	9.53dia@457.2	12.7dia@304.8
	ndt-x	3	2
	ndt-y	3	2
8~10	Size	609.6×609.6	609.6×558.8
	Longit. reinf.	16-25.4dia	20-25.4dia
	Transv. reinf.	9.53dia@406.4	12.7dia@279.4
	ndt-x	3	2
	ndt-y	3	2
11~12	Size	508×508	508×457.2
	Longit. reinf.	24-19.05dia	22-22.23dia
	Transv. reinf.	9.53dia@304.8	12.7dia@228.6
	ndt-x	4	2
	ndt-y	4	2

ndt-x: number of transverse rebar in x direction
 ndt-y: number of transverse rebar in y direction

Table 4 Earthquakes used

EQ.ID	EQ. Name	Year	Station
EQ1	Cape Mendocino	1992	Petrolia
EQ2	Northridge	1994	Sylmar - Converter Sta. East
EQ3	Imperial Valley	1979	El Centro Array #7
EQ4	Northridge	1994	Rinaldi Receiving Sta
EQ5	Superstition Hills	1987	Parachute Test Site
EQ6	Northridge	1994	Newhall W Pico Canyon Rd.
EQ7	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU052
EQ8	Kobe, Japan	1995	Takatori

골조 시스템에 대한 보정 계수 또한 나타나 있다. 보정 계수는 Fig. 4에서와 같이 각 모델의 1차 모드 주기를 기준으로 보정된 선형 응답 스펙트럼을 통하여 산정되었다. 특수모멘트골조 모델의 1차 모드 주기는 1.45초로, 비연성적인 상세를 가지는 모델의 1차 모드 주기는 2.2초로 나타났다. 이에 따라 각 지진파의 보정 PGA도 다양한 범위 안에서 형성되었다.

Table 5 Peak ground accelerations and scale factors

EQ.ID	PGA (g)	File name	SF-D	SF-ND
EQ1	0.66	PET090.AT2	2.17	1.89
EQ2	0.49	SCE288.AT2	1.97	1.63
EQ3	0.46	H-E07230.AT2	2.21	1.60
EQ4	0.84	RRS228.AT2	1.00	1.55
EQ5	0.45	B-PTS225.AT2	1.05	1.00
EQ6	0.45	WPI046.AT2	1.37	1.18
EQ7	0.42	TCU052-N.AT2	1.01	0.94
EQ8	0.62	TAK090.AT2	1.69	3.32

SF-D: Scale factor for ductile system
 SF-ND: Scale factor for non-ductile system

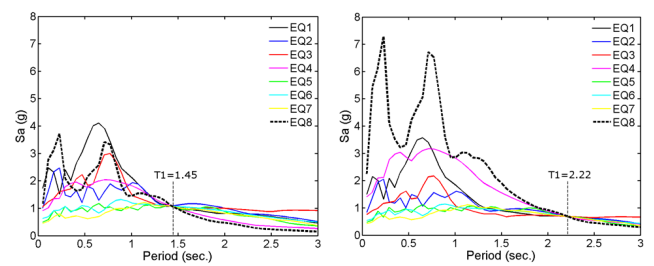


Fig. 4 Selected ground motions' acceleration response spectra (Scaled based on the first mode period)

3.2 응답 평가

본 연구에서는 Tables 4와 5에 나타나 있는 8개의 지진파를 OpenSees에 입력하여 비선형 동적해석을 수행하였다. 연구의 주목적은 재료 구성모델에 대한 동적응답의 민감도 분석에 있다. 충분한 비선형 거동을 관찰하기 위하여 보정 계수는 비교적 크게 산정되었으며, 감쇠 계수는 5%가 사용되었다.

Figs. 5~7의 (a)와 (b)에 첫 번째와 여덟 번째 지진파에 대한 Non-ductile 시스템의 층간변위 분포도 결과가 각각 나타나 있고, Figs. 8~10의 (a)와 (b)에는 Ductile 시스템에 대한 층간변위 분포도 결과가 각각 나타나 있다. Figs. 5~7과 Figs. 8~10을 비교해 볼 때 Non-ductile 시스템에서 철근의 구성모델에 대한 동적응답의 민감도가 Ductile 시스템에서의 그것보다 큰 것을 알 수 있다 (Figs. 5, 6, 8, 9). Steel 01과 Steel 02는 비슷한 구성모델을 가지는 바, 층간변위의 분포도나 크기에 있어 큰 차이를 보이지는 않았지만, 보다 발전된 모델인 RS 구성모델은 저감 특성을 반영하기 때문에 층간변위의 동적응답이 다른 구성모델을 사용했을 때와 비교하여 상이하였다. 따라서 이에 대한 정밀한 모델링이 차후에

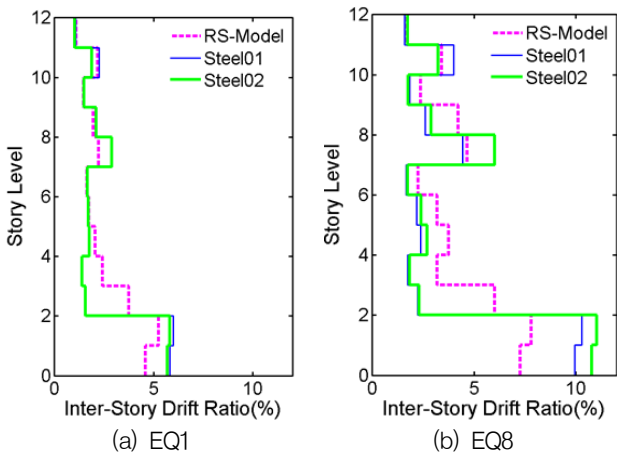


Fig. 5 Results of non-ductile system using Mander et al. (1997) model

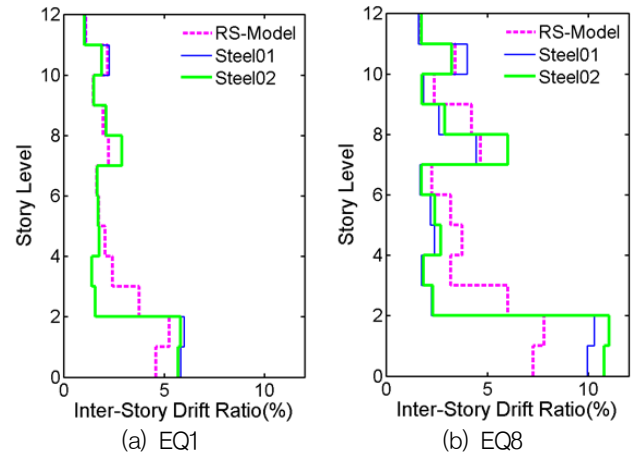


Fig. 6 Results of non-ductile system using Hoshikuma et al. (1998) model

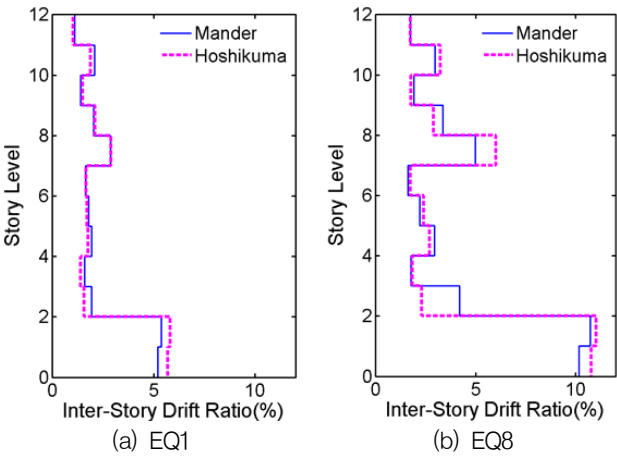


Fig. 7 Results of non-ductile system using Bi-linear model (Steel 02)

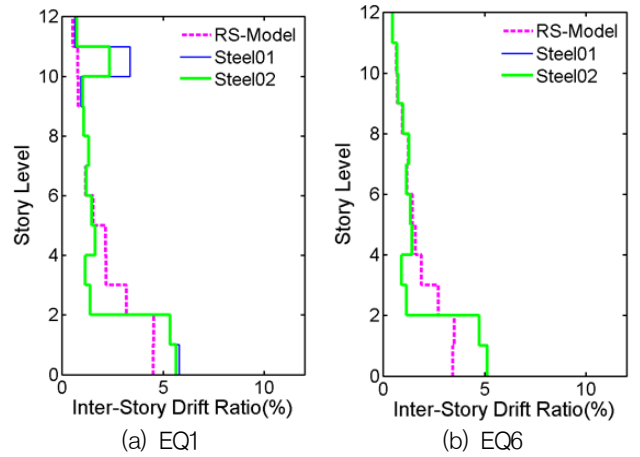


Fig. 8 Results of ductile system using Mander et al. (1997) model

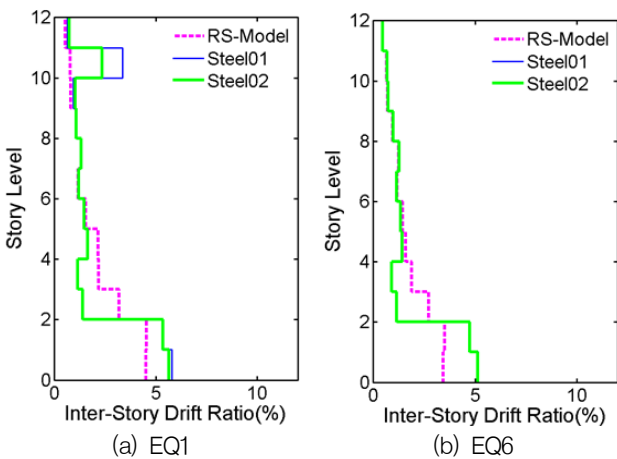


Fig. 9 Results of ductile system using Hoshikuma et al. (1997) model

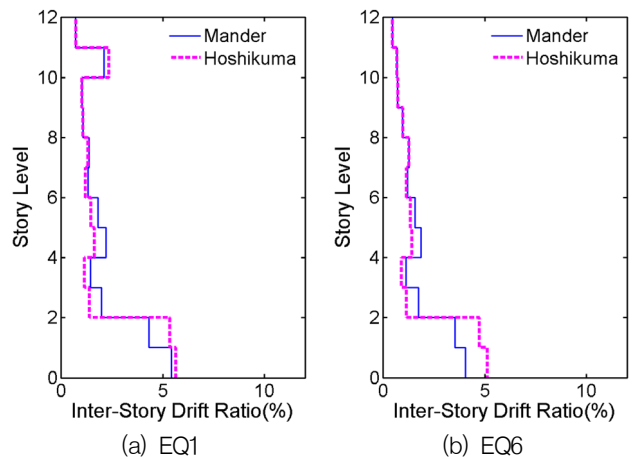


Fig. 10 Results of ductile system using Bi-linear model (Steel 02)

도 계속적으로 요구된다.

반면 두 시스템 모두 특정 지반운동에서 구속 콘크리트 코어의 구성모델에 대한 동적응답의 민감도는 그리 크지 않다 (Figs. 7, 10). 따라서 비선형 동적해석을 수행함에 있어 복잡한 콘크리트의 거동에 대한 비용 투자는 상대적으로 과할 수 있을 것이다.

한편, Non-ductile 시스템의 경우 비록 두 개의 지진파가 1차 모드 주기에서 같은 응답 스펙트럼을 가지더라도 지진파의 특성에 따라 층간 변위가 매우 다르게 해석됨을 Figs. 5, 6, 7의 (a)와 (b)를 통해 확인할 수 있다. 특정 층에서는 그 차이가 2배에 이를 정도로 지진파의 특성에 따라 매우 민감한 결과가 나타났다. 이것은 비선형 동적해석에 있어 최소 7-8개의 지진파가 사용되는 것이 바람직하다는 것을 추가적으로 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 모멘트골조에서 각 재료의 구성모델에 따른 비선형 동적거동의 특성을 파악하였고, 각각의 구성모델에 대한 동적응답 민감도를 과학적으로 분석하였다. 재료의 구성모델은 각 부재 단면의 파이버 모델링을 적용하는데 있어 매우 중요한 요소이다. 특수모멘트골조 상세를 가지는 시스템과 비연성적인 상세를 가지는 시스템에 대하여 OpenSees를 사용하여 보정된 8개의 지진파를 기반으로 비선형 동적해석을 수행하였고, 그 결과 재료의 구성모델에 따른 동적거동의 민감도를 구할 수 있었다.

해석결과에 따르면 구속된 코어 콘크리트 모델과 일반 콘크리트의 구성모델은 공히 동적응답에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 철근의 경우에 층간변위와 관련하여 구성모델에 따른 동적거동은 매우 민감하게 응답하는 것으로 나타났으며, 몇 개 층에서의 층간변위는 그 차이가 철근 구성모델 선택에 따라 2배 이상 차이 나는 것으로 나타났다. 따라서 Non-ductile과 Ductile 골조 공히 비선형 동적해석을 수행하는데 있어 정밀한 철근 구성모델의 선택은 매우 중요한 것으로 사료된다. 향후 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되어야 하며, 특히 반복 거동에 따른 변형률 증가를 보다 정밀하게 구현할 수 있는 모델의 개발은 시급하다.

감사의 글

본 논문은 UC Davis의 Prof. Sashi Kunnath와 서울대학교의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Chang, G. and Mander, J., "Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part I - Evaluation of Seismic Capacity", NCEER Technical Report 94-0006, Buffalo, New York, 1994, p.240.
2. Hognestad, E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members", Bulletin No.399, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1951, p.128.
3. Kang, T. H.-K. and Rha, C.-S., "Generalized Analysis of RC and PT Flat Plates Using Limit State Model", Journal of Korea Concrete Institute, Vol. 21, No. 5, 2009, pp.599-609 (in Korean).
4. Kunnath, S. K., Heo, Y. A. and Mohle, J. F., "Nonlinear Uniaxial Material Model for Reinforcing Steel Bars", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 4, 2009, pp.335-343.
5. Lee, L.-H., Han, S.-W. and Oh, Y.-H., "Determination of Ductility Factor Considering Different Hysteretic Models", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, No. 9, 1999, pp.957-977.
6. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., "Theoretical Stress Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp.1804-1826.
7. Menegotto, M. and Pinto, P., "Method of Analysis of Cyclically Loaded RC Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements Under Normal Force and Bending", Preliminary Report, IABSE, Zurich, Vol. 13, 1973, pp.15-22.
8. OpenSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation), <http://opensees.berkeley.edu>, 2012.
9. Riddell, R., Garcia, J. E. and Garces, "Inelastic Deformation Response of SDOF Systems Subjected to Earthquakes", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, No. 3, 2002, pp.515-538.
10. Yang, J.-M., Lee, J.-H., Choi, S.-W. and Park, H.-S., "An Analytical Study on the Management of Historical Displacement Data", Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 17, No. 1, 2013, pp.156-158 (in Korean).

Received : 04/29/2013

Revised : 05/12/2013

Accepted : 05/16/2013

요 지

철근콘크리트 구성요소에 대한 비탄성 거동 모델 개발은 철근콘크리트 구조물에 대한 성능기반 내진평가의 정밀도 향상에 있어 매우 중요한 요소로 본 연구에서는 지진과 같은 불규칙 반복 하중에 대한 철근콘크리트 구조물의 비선형 동적응답을 예측함에 있어 콘크리트 구성 모델의 특성에 따른 민감도를 고찰하고자 하였다. 해석결과에 따르면 구속된 코어 콘크리트 모델과 일반 콘크리트의 구성모델은 동적응답에 큰 영향을 끼치지 않았으나 철근의 경우에 층간변위와 관련하여 구성모델에 따른 동적거동은 매우 민감하게 응답하는 것으로 나타났으며, 몇 개 층에서의 층간변위는 그 차이가 철근 구성모델 선택에 따라 2배 이상 차이 나는 것으로 나타났다. 따라서 Non-ductile과 Ductile 골조 공히 비선형 동적해석을 수행하는데 있어 정밀한 철근 구성모델의 선택은 매우 중요한 것으로 사료된다.

핵심 용어 : 비선형 동적해석, 구성모델, 콘크리트, 철근, 지진응답, 내진평가
