

경주지진과 유사한 특성을 가지는 지반가속도로 가진된 단주기 구조물 변위연성도 평가

Ductility Demand for Short-period Structures Excited by Ground Accelerations Similar to Gyeong-ju Earthquakes

노지은¹⁾ · 이상현^{1)*} · 서준원¹⁾ · 김동관²⁾

Roh, Ji Eun¹⁾ · Lee, Sang Hyun^{1)*} · Seo, Jun Won¹⁾ · Kim, Dong Kwan²⁾

¹⁾단국대학교 건축공학과 ²⁾센구조 연구소, 연구개발부

¹⁾Department of Architectural Engineering, Dankook University, ²⁾Institute of Technology, SEN Structural Engineering Co, Ltd.

/ A B S T R A C T /

In this paper, time and frequency domain characteristics of Gyeong-ju earthquakes were investigated, and nonlinear time history analyses were conducted for bi-linear hysteretic structures excited by short-duration ground accelerations. Previous studies showed that larger inelastic displacements than the peak displacement of the corresponding elastic system were observed especially for the structures with structural period shorter than 0.3s, and the similar results could be obtained when long-duration ground accelerations were used as excitation loads. For the short-duration earthquakes, however, the inelastic displacements were not so large and almost identical to the peak elastic displacements.

Key words: Gyeong-ju earthquake, Short-period structures, Short-duration earthquakes, Inelastic response

1. 서론

지난 2016년 9월 12일 계기지진관측 이래 한반도 최대인 것으로 보도된 리히터 규모 5.8의 경주지진이 발생하였다. 지속시간은 10초 이내로 짧은 편이었지만, 전국의 모든 국민들이 지진을 느낄 정도로 큰 규모의 지진이었다. 종전 최대 규모의 지진은 1980년 북한에서 발생한 의주 지진으로 규모 5.3이었으며, 남한 내에서 발생한 최대 규모의 지진은 1978년 9월에 발생한 속리산 지진으로 리히터 규모 5.2였다. 경주지진은 19:44분에 경상북도 경주시 남남서쪽 8.2 km 지역에서 규모 5.1의 전진이 발생하였으며, 20:32분에 경상북도 경주시 남남서쪽 8.7 km 지역에서 규모 5.8의 본진이 발생하였다. 본진이 발생한 날 규모 2-3의 여진이 91차례 이상 발생하였으며, 10월 중순까지 총 500여회 이상의 여진이 일어나 지진에 대한 경향이 거의

없는 국민들에게 큰 불안감을 주고 있다. 지진 진원은 깊이 13-17 km에 주로 분포하며, 평균깊이는 15.2 km로 비교적 진원 깊이가 얕은 지진인 것으로 분석되었다. 경주지진으로 인해 신발장 및 천장 등 비구조재의 전도로 인한 수십명의 부상자가 보고되었으나, 다행히 심각한 인명피해는 발생하지 않았다. 경주지진은 고주파수 성분이 강하고 지속시간이 매우 짧으면서도 최대지반가속도는 매우 큰 충격파(impulse)와 같아 장주기구조물에는 영향을 주지 않고 단주기구조물 및 비구조재에만 큰 영향을 주었다. 본 연구에서는 경주지진과 특성을 분석하고 국외에서 발생한 실제 지진 중 이와 유사한 특성을 가지는 지반가속도를 사용하여 경주지진과 유사한 특성의 지진이 큰 영향을 줄 것으로 예상되는 극단주기 구조물의 비선형거동특성을 분석하고자 한다.

2. 경주지진과 특성 분석

Park JH는 경주지진에서 본진 발생시 MKL, USN, DKJ 3군데 관측소에서 측정한 지반가속도기록에 대한 시간영역 및 주파수영역 특성을 분석

*Corresponding author: Lee, Sang Hyun

E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

(Received November 21, 2016; Revised December 5, 2016; Accepted December 5, 2016)

하였다[1]. MKL과DKJ는 지반조건이 S_B 이고 USN은 S_c 지반이다. 시간 영역에 대한 분석결과USN 관측소 계측기록이 가장 큰 최대지반가속도를 가지며, 0.01초 간격으로 계측한 경우(100 sample) $422.2 \text{ cm/s}^2(0.43 \text{ g})$ 의 최대지반가속도를 가지고, 0.05초 간격으로 계측된 경우(20 sample) $281.6\text{cm/s}^2(0.29 \text{ g})$ 의 최대지반가속도를 가지는 것으로 발표하였다. 샘플링을 작게 하여 Nyquist 주파수가 50 Hz에서 10 Hz로 줄어들 때 가속도 크기가 크게 줄어든다는 것은 경주지진이 10 Hz이상의 고주파수 성분이 매우 많은 지진파임을 의미한다. Fig. 1은 경주지진의 관측소별 시간이력을 보여준다. 순간 최대가속도는 매우 크지만 지속시간이 매우 짧은 충격파에 가까운 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 경주 지진의 주파수 응답함수를 보여준다. DKJ와MKL의 경우 특정 주파수 성분이 아닌 비교적 주파수별로 고른 크기를 가지는 광대역(broad-band) 주파수 특성을 가지고 있으며, 최대지반가속도가 가장 큰 USN의 경우 10 Hz 근처 대역에서 가장 많은 진동수 성분을 가지고 있음을 알 수 있다.

Lee CH는 25 Hz이상의 가속도성분은 잡음에 가깝고 실제 구조물에 주

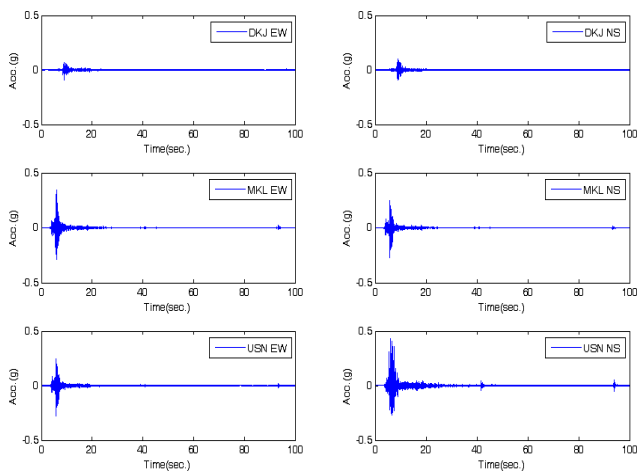


Fig. 1. Ground Accelerations of Gyeong-Ju Earthquake (Sampling Rate 100 Hz)

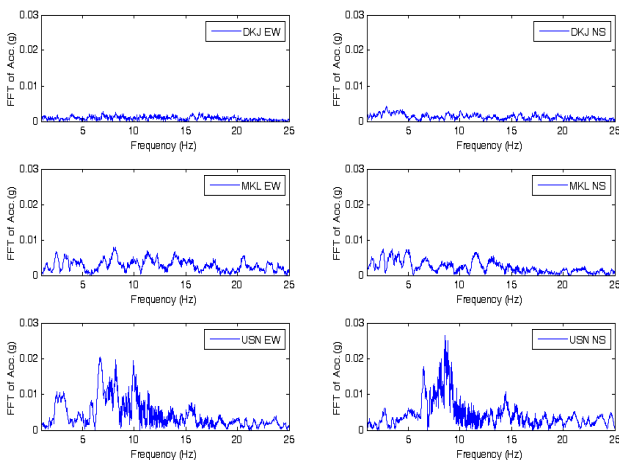


Fig. 2. Frequency Responses of Gyeong-Ju Earthquake (Sampling Rate 100 Hz)

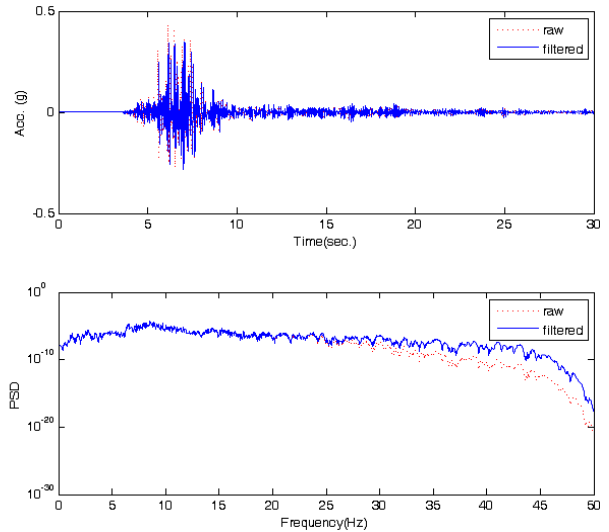


Fig. 3. Original and Low-pass Filtered Ground Accelerations of Gyeong-Ju Earthquake (2016, MSN NS component)

는 영향이 매우 제한적일 것으로 판단하여 저역통과필터(low-pass filter)를 사용한 가속도 시간이력을 구조물 해석에 사용할 것을 제안하였다 [2]. 본 연구에서도 이후의 해석에서는 저역통과필터를 사용한 가속도를 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 각각 경주지진(2016, USN NS 성분) 원가속도 및 저역통과필터 지반가속도의 시간이력과 파워 스펙트럼밀도함수를 보여준다. 저역통과필터를 사용한 결과, 최대가속도가 0.43 g에서 0.35 g로 감소되었으며, 25 Hz이상의 성분이 제거되었음을 확인할 수 있다.

$[0, t]$ 에서의 축적된 지진에너지는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_a(t) = \int_0^t a^2(t)dt \tag{1}$$

여기서, $a(t)$ 는 지반가속도, t 는 시간을 의미한다.

Sjoji 등은 지진파의 지속시간을 다음과 조건을 만족시키는 t 의 구간크기로 정의하였다 [3].

$$0.05 \leq E(t)/E(T) \leq 0.95 \tag{2}$$

여기서, T 는 전체시간을 의미한다.

식 (2)는 강진지속시간이 특정시점에서의 지진에너지가 전체 지진에너지의 5%를 초과하는 시점부터, 95%에 도달하는 시점까지임을 의미한다. 식 (2)를 조금 더 일반화 시킬 경우 다음과 같이 강진지속시간을 정의할 수 있다.

$$t_1 = \min(t; E_a(t) \geq r_{\min}) \tag{3}$$

$$t_2 = \max(t; E_a(t) \leq r_{\max}) \tag{4}$$

$$t_d = t_2 - t_1 \quad (5)$$

여기서, t_d 는 강진지속시간이며, t_1 는 지반가속도의 제곱을 전체시간동안 적분한 값에 대하여 $t=0$ 에서 특정시점까지 적분한 값이 r_{min} 이상이 되는 시간 중 최소값을 의미한다. t_2 는 지반가속도의 제곱을 전체시간동안 적분한 값에 대하여 $t=0$ 에서 특정시점까지 적분한 값이 r_{max} 이하가 되는 시간 중 최댓값을 의미한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 대표적인 지진파 중 하나인 Imperial Valley 지진(1940, ElCentro, NS 성분), 경주지진(2016, USN, NS 성분)의 시간이력 및 식(2)에 따른 지속시간을 보여준다. 여기서, Sjoji 등의 연구와 같이 $r_{min} = 0.05$, $r_{max} = 0.95$ 로 설정하였다. Imperial Valley 지진의 경우 누적에너지가 총에너지의 5%를 넘는 시점인 $t_1 = 1.66$ 초, $t_2 = 26.1$ 초로 지속시간 $t_d = 26.1 - 1.66 = 24.44$ 초임을 알 수 있다. 반면에 경주지진의 경우 $t_1 = 5.61$ 초, $t_2 = 14.07$ 초로 $t_d = 14.07 - 5.61 = 8.46$ 초로 강진지속시간이 Imperial Valley 지진에 비해 1/3수준으로 짧다는 것을 알 수 있다.

Table 1은 한반도지역에서 계측된 지진 데이터 중 대표적 지진파로 비교적 내진설계에 많이 이용되고 있는 Imperial Valley(1940, ElCentro), Taft(1952, Lincoln School), Hachinohe(1968) 지진 및 경주지진의 식(3)-(5)에 의한 지속시간을 보여준다. 외국에서 계측된 지진은 모두 PGA가 0.16g-0.35g의 분포를 가지고 있다. Case 1에서 $r_{min} = 0.05$, $r_{max} = 0.95$ 로 지속시간동안의 누적에너지가 전체에너지의 90%인 경우 국외에서 계측된 지진자료의 지속시간은 모두 24초 이상인 반면, 경주지진은 대부분 10초 이하임을 알 수 있다. 특히, 가장 높은 PGA를 가지는 USN계측소의 경우 Case 2, Case 3과 같이 지속시간동안의 누적에너지가 각각 85%, 80%로 감소되는 경우 지속시간이 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 경주지진이 특정시간대역에만 집중되게 높은 가속도를 가지는 충격파에 가까운 지진임을 의미한다.

다음과 같이 지속시간이 t_d 인 $t_o \leq t \leq t_o + t_d$ 구간에서의 누적에너지의 비율을 t_o 를 변화시키면서 구한 후, 이 중에서 최댓값을 지속시간 t_d 에 대한 최대지진에너지 대폭값으로 식(6)과 같이 정의할 수 있다. 이는 누적에

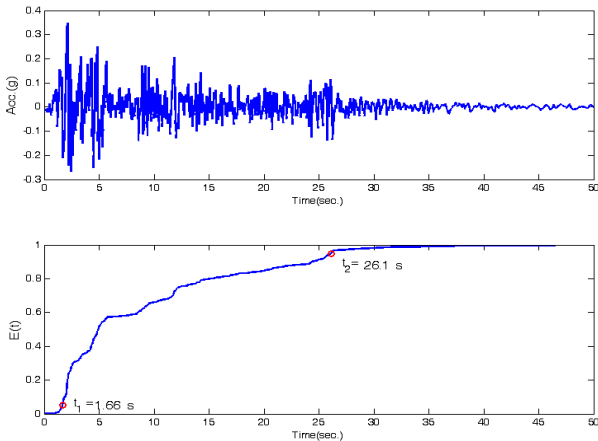


Fig. 4. Ground Acceleration and Duration of Imperial Valley Earthquake (1940, ElCentro, NS component)

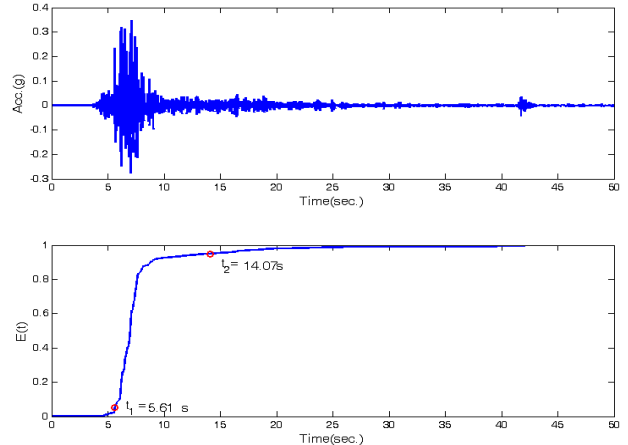


Fig. 5. Ground Acceleration and Duration of Gyeong-Ju Earthquake (2016, USN, NS component)

Table 1. Strong Motion Duration t_d

Damage patterns	Definition	Case 1	Case 2	Case 3
		$r_{min} = 0.05$ $r_{max} = 0.95$	$r_{min} = 0.075$ $r_{max} = 0.925$	$r_{min} = 0.10$ $r_{max} = 0.90$
Imperial Valley (NS)	0.35	24.44	23.82	22.38
Imperial Valley (EW)	0.21	24.25	23.52	23.1
Taft (1952, 69Deg.)	0.16	30.54	25.46	21.42
Taft (1952, 339Deg.)	0.18	28.88	24.72	20.24
Hachinohe (1968,EW)	0.23	27.92	24.95	23.00
Hachinohe (1968,NS)	0.19	24.4	22.26	20.41
Gyeong-Ju (2016,DKJ,EW)	0.08	10.5	8.67	7.06
Gyeong-Ju (2016,DKJ,NS)	0.09	5.0	2.63	2.02
Gyeong-Ju (2016,MKL,EW)	0.24	1.9	1.30	1.21
Gyeong-Ju (2016,MKL,NS)	0.24	1.7	1.35	1.23
Gyeong-Ju (2016,USN,EW)	0.37	4.8	2.46	1.88
Gyeong-Ju (2016,USN,NS)	0.35	8.46	4.05	2.71

너지비를 특정한 값으로 하는 경우, 임의구간의 지속시간 중에서 가장 짧은 지속시간 값에 대응된다고 할 수 있다.

$$E(t_d) = \max \left(\frac{1}{E(T)} \int_{t_o}^{t_o+t_d} a^2(t) dt ; \text{ for } 0 \leq t_o \leq T-t_d \right) \quad (6)$$

Fig. 6은 식 (6)에 의해 정의된 Imperial Valley 지진(1940, ElCentro, NS 성분)과 경주지진(2016, USN, NS 성분)의 특정한 지속시간 t_d 에 대한 최대지진에너지를 보여준다. 누적에너지를 90%로 만들 수 있는 최소지속시간의 경우 경주지진은 3.86초인 반면, Imperial Valley지진은 23.58초임을 알 수 있다.

Fig. 7은 경주지진(2016, USN, EW/NS 성분), Imperial Valley 지진의 응답스펙트럼, 그리고 KBC2009와 KBC2016의 S_c 지반에서의 설계 응답스펙트럼을 보여준다. 강제저동에 가깝게 지반가속도와 거의 동일하게 움직이는 주기 0.05초 이하의 구조물을 제외하고는 원지진파와 필터된 지진파를 사용한 응답스펙트럼은 모든 주기구간에서 동일한 응답스펙트럼을 가진다. 이로부터 필터된 가속도는 원지진파와 비교할 때 최대지반가속도가 크게 감소하였으나 구조물의 지진응답을 평가하는 데에는 대부분의 주기의 구조물에 대하여 차이를 가지지 않도록 고주파수 노이즈 성분만을 효

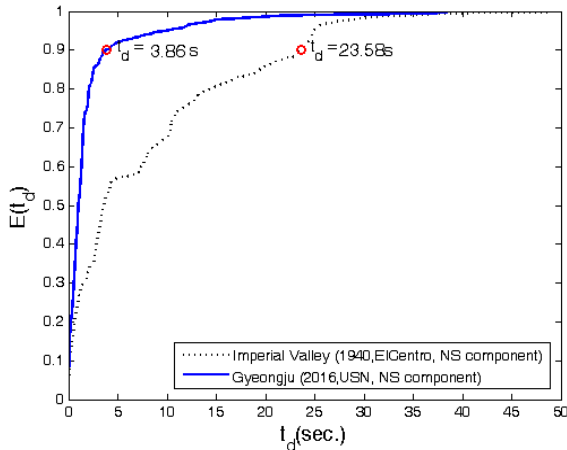


Fig. 6. Maximum cumulated energy during specified duration time

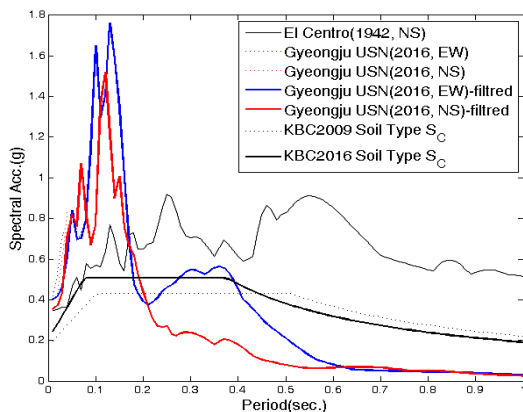


Fig. 7. Response Spectrum

율적으로 제거했음을 알 수 있다. El Centro 지진의 경우 최대지반가속도가 0.35 g로 필터된 경주지진파(USN, NS 성분)와 유사하다. 그러나 동일한 최대지반가속도를 가지는 두 지진파의 설계응답스펙트럼은 큰 차이를 가지는 것을 알 수 있다. 경주지진의 경우 0.2초 이하의 극단주기 구조물의 가속도 응답은 KBC2016 설계 응답스펙트럼보다 크게 증폭시키지만 0.4초 이상의 주기의 구조물은 크게 감소시킴을 알 수 있다. 이는 경주지진파가 고주파수 특성을 가지고 지속시간이 짧아 장주기 구조물을 가진하는데 충분한 에너지를 가지지 못함을 의미한다.

IBC2000에서는 상부 30 m 토층의 평균 전단파속도 ($V_{s,30}$)을 사용하여 지반특성을 분류하였으며, 국내내진설계기준은 이를 준용하여 KBC2005와 KBC2009에 적용하였다. 그러나 IBC2000의 경우 기반암까지의 깊이가 200 m 이상인 경우로 기반암 깊이가 작은 국내 지반특성과 다르다. Yun 등은 국내 지반특성에 적합한 설계응답스펙트럼을 산정하기 위하여 국내 여러지역의 182개 지반에 대하여 부지의 고유주기 지진응답해석을 수행하였다 [4]. 해석결과, 국내 지반의 얇은 기반암 깊이와 단주기 영역의 지반고유주기로 인하여, 단주기 영역에서의 증폭은 KBC2009의 단주기 설계스펙트럼 가속도보다 크게 발생하였고, 장주기 영역에서의 증폭은 KBC2009의 단주기 설계스펙트럼 가속도보다 작게 발생하였다.

Park 등도 국내 지반특성을 고려하여 낮은 심도의 연약지반에 대한 부지 비선형 지진응답해석을 수행하였다 [5]. Yun 등의 결과와 같이 연약지반의 깊이가 낮을수록 단주기 영역의 응답이 증폭되었다.

이는 토사지반의 물성 뿐만 아니라 토사지반의 깊이도 부지응답에 영향을 미침을 나타낸다. 따라서 이러한 연구결과를 반영하여 KBC2016에서는 국내와 같이 보통암까지의 깊이가 얇은 지역은 주로 단주기 지반이므로 이에 대한 증폭을 고려할 수 있도록 S_c , S_D 지반증폭계수를 보통암까지의 깊이를 기준으로 나누어 적용하였다 [6]. Fig. 7에서 보통암까지의 깊이가 10 m로 낮은 S_c 지반의 KBC2016과 KBC2009에 따른 설계가속도응답을 보여준다. KBC2009와 비교할 때 KBC2016의 단주기 설계스펙트럼 가속도는 증폭되고 장주기 설계스펙트럼 가속도는 감소함을 알 수 있다. 이는 경주지진 응답스펙트럼과 유사한 특성을 지닌다.

3. 경주지진과 유사한 특성을 가지는 지진파 선정

전절에서는 경주지진이 높은 PGA를 가지는 반면 누적에너지로 대응되는 강진지속시간이 매우 짧고 고주파수 특성이 큰 충격파에 가까워 0.2초 이하의 극단주기 구조물에 대해서만 매우 큰 가속도응답스펙트럼을 유발하는 지진임을 확인하였다. 본 절에서는 세계에서 관측된 지진파 중 경주지진과 같이 지속시간이 10초 이하로 짧은 지진파를 선정한 후 이를 경주지진과 유사한 응답스펙트럼을 가지는 지진파를 가지도록 스케일링하여 사용하였다. Table 2는 각 지진의 목록 및 스케일팩터(scale factor), PGA, 그리고 지속시간 t_d 를 보여준다. t_d 는 $r_{min} = 0.05$, $r_{max} = 0.95$ 를 사용하여 설정하였다. PEER [7], USGS [8], ESMD [9] 등 전세계의 강지진동 기록을 제공하는 사이트에서 다음과 같은 절차로 경주지진과 유사한 지진기록을 선정하였다. 경주지진 시, 진앙거리가 5.8 km인 MKL 관측소에서 측정된 지진기록의 SRSS 응답스펙트럼을 목표응답스펙트럼으로 하여, 식 (7)과 같이 수집된 지진기록의 SRSS 응답스펙트럼과 목표응답스펙트럼의 평균

Table 2. Ground motion records in this study

Earthquakes	Magnitude	Distance (km)	Scale Factor	PGA(g)		t_d (s)	
				X	Y	X	Y
EQ-1 : Morgan Hill, 1984, Gilroy	6.19	15	2.56	0.16	0.25	9.4	8.5
EQ-2 : Friuli, 1987, Tolmezzo	5.2	27	2.58	0.33	0.20	2.1	4.1
EQ-3 : Kalamata, 1987, Kyparrisia	5.3	17	2.63	0.27	0.30	4.8	2.8
EQ-4 : Sierra Madre, 1991, Vasquez	5.61	40	2.36	0.23	0.30	4.2	4.2
EQ-5 : Coyote Lake, 1984, Gilroy	5.74	11	1.78	0.16	0.20	6.7	57
EQ-6 : Friuli, 1984, Tarcento	5.3	8	1.45	0.27	0.13	3.2	3.7
EQ-7 : Friuli, 1977, Somplago	5.4	9	1.44	0.28	0.14	1.7	2.9
EQ-8 : San Francisco, 1957, Golden gate	5.28	11	2.12	0.18	0.20	3.5	3.0
EQ-9 : Friuli, 1984, Tarcento	6	12	1.42	0.19	0.16	6.8	7.4
EQ-10 : Kozani, 1995, Kozani	6.5	17	0.97	0.20	0.14	6.4	8.7
EQ-11 : Bingol, 2003, Bingol	6.3	14	0.35	0.17	0.10	4.6	6.6

제곱오차(Mean Square Error, MSE)를 구하였다.

$$MSE = \frac{\int_{T_b}^{T_a} [\alpha S_a^R(T) - S_a^T(T)]^2 dT}{T_a - T_b} \quad (7)$$

여기서, S_a^R 은 수집된 지진기록의 SRSS 응답스펙트럼, S_a^T 은 목표응답스펙트럼으로 MKL 관측소에서 측정된 지진기록의 SRSS 응답스펙트럼이다. T_a 와 T_b 는 평균제곱오차를 계산하는 주기의 상, 하한값으로 경주지진은 단주기 특성이 크기에 따라 0.01 ~ 1초 주기에서 평균제곱오차를 계산하였다. 이로부터, 다음 미분식과 같이 평균제곱오차가 최소가 되는 조정계수(α)를 구할 수 있다[10].

$$d(MSE)/d\alpha = 0 \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{T=T_a}^{T_b} (S_a^R(T) S_a^T(T))}{\sum_{T=T_a}^{T_b} (S_a^R(T))^2} \quad (9)$$

경주지진시, MKL 관측소에서 측정된 지진기록을 바탕으로 수집된 지진기록의 조정계수(α)를 구하고, 조정계수가 반영된 지진기록의 SRSS 응답스펙트럼과 MKL 관측소에서 측정된 지진기록의 SRSS 응답스펙트럼의 평균제곱오차가 작은 지진들을 수집하였다.

Fig. 8은 경주지진과 유사한 지진으로 선정된 지진의 시간이력 및 응답스펙트럼을 보여준다. 강진 지속시간이 10초 이하로 짧고, 0.2초 이하의 극단주기 구조물만 가속도응답스펙트럼을 크게 증폭시키는 등 경주지진과 유사한 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

4. 극단주기구조물 변위연성도 평가

구조물의 항복변형에 대한 최대비탄성변형의 비를 나타내는 연성도는

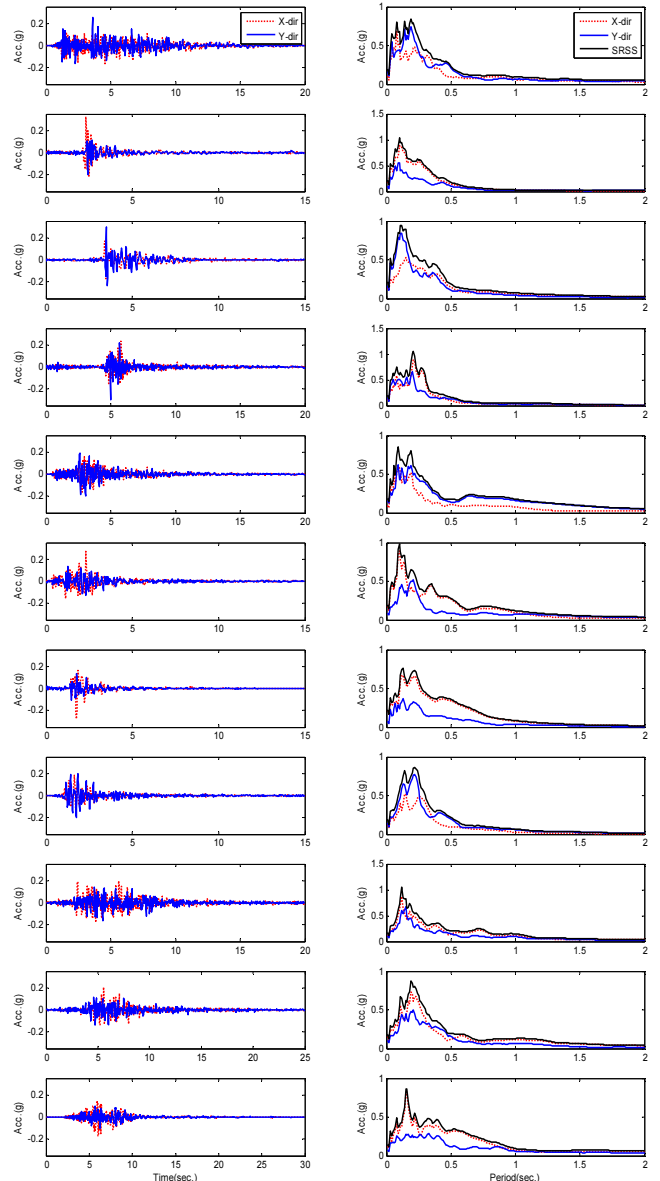


Fig. 8. Ground Acceleration Records similar to Gyeongju Earthquake and Acceleration Response Spectrum of the Records

구조물의 요구연성능력을 의미하며, 구조물이 이 연성도를 확보할 수 있도록 설계하는 경우 설계지진하중을 감소시켜 설계할 수 있다. Newmark and Hall은 최초로 구조물의 주기별로 연성도에 따른 강도감소계수 공식을 제안하였다. 구조물은 완전탄소성모델을 사용하였으며, El Centro 지진과 다른 두 개의 지진기록에 대한 응답스펙트럼 분석을 통해 구조물의 주기를 가속도, 속도, 변위 민감구역으로 구분한 후 각 주기구간에 적합한 강도계수 감소식을 제안하였다[11]. 이후 여러 학자에 의해 강성저하 등을 고려한 구조물 모델(Nassar and Krawinkler), 지반주기 등 지반의 효과를 고려한 연구(Miranda, Song) 등이 수행되었다[12-14]. Cho 등은 비탄성요구스펙트럼 작성을 위한 기존의 강도감소계수 공식을 비교한 후, 이를 회귀분석하여 분수함수 형태의 연성도에 따른 강도감소계수 산정식을 제안하였다[15].

본 연구에서는 경주지진과 유사한 특성의 지진기록을 사용하여 항복 후 강성비 및 강도감소계수에 따른 주기 0.5초 이하인 단주기 구조물에 대한 요구연성도를 평가하였다. 일반적으로 구조물의 비선형 거동에 따른 최대 변위를 예측하기 위해서는 구조물의 이력형상을 단순화할 필요가 있다. Chopra는 Fig. 9와 같은 구조물의 비선형 힘-변위 이력거동을 항복이후의 강성이 0인 완전탄소성(elastoplastic) 시스템으로 가정한 후, 항복변위 u_y 에 대한 최대변위 u_m 의 비인 요구연성도 $\mu (= u_m/u_y)$ 를 탄성시스템에 요구되는 최대내력 f_o 와 항복강도 f_y 의 비인 항복강도감소계수(yield reduction factor) R 의 함수로 표현하였다[16].

$$R = \frac{f_o}{f_y} = \frac{u_o}{u_y} \tag{10}$$

여기서, f_y , u_y 는 탄소성시스템 항복강도 및 항복변위이며, f_o , u_o 는 탄성시스템의 최대하중 및 최대변위이다.

FEMA440에서는 u_o 를 사용하여 u_m 을 예측하는 변위계수법을 제안하고 있다[17]. 변위계수법은 u_o 와 u_m 이 동일하다는 동일변형(equal displacement) 원리를 기본으로 u_o 에 R , 주기, 반복이력에 따른 강도저하 등을 고려한 계수를 곱하여 u_m 을 예측하는 방법이다. 동일변형의 원리가 적용되는 경우 연성도계수 μ 와 강도감소계수 R 의 관계는 다음과 같다.

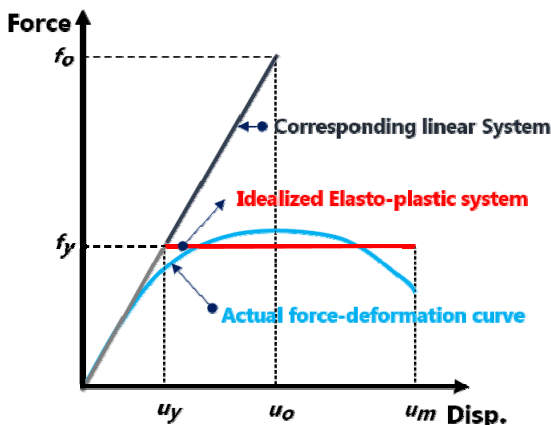


Fig. 9. Force-deformation curve; actual response, corresponding linear system, and Elastoplastic idealization

$$\mu = R \tag{11}$$

동일변형 원리와 다르게 최대변형이 발생할 때까지 구조물에 축적된 에너지가 동일한 것으로 가정하는 동일에너지(equal energy)방법을 사용하는 경우, 다음과 같이 최대변위를 예측할 수 있다.

$$\frac{1}{2}f_o u_o = \frac{1}{2}f_y u_y + (u_m - u_y)f_y \tag{12}$$

식 (12)의 양변을 $f_y u_y$ 로 나눈 후 정리하면 다음과 같이 μ 를 R 에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{R^2 + 1}{2} \tag{13}$$

Newmark and Hall과 Chopra는 완전탄소성 구조물에 대하여 비탄성 변위응답을 계산한 후 주기가 특정 값보다 작은 단주기 구조물의 경우에는 동일에너지방법을 사용하여 계산된 식(11)이 적합하고, 주기가 특정 값보다 큰 장주기 구조물의 경우에는 동일변형의 원리를 사용한 식(13)이 적절함을 보였다[11, 16].

Fig. 10과 같이 완전탄소성 구조물이 아닌 항복후 강성비(α)가 존재하는 경우 α 는 식(14)와 같이 정의한다.

$$\alpha = \frac{k_e}{k_e + k_d} \tag{14}$$

동일에너지 원리가 적용되면 다음과 같은 식을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{2}f_o u_o = \frac{1}{2}f_y u_y + \frac{1}{2}(u_m - u_y)\{2f_y + \alpha(u_m - u_y)\} \tag{15}$$

식(15)의 양변을 $f_y u_y$ 로 나눈 후 다음과 같이 R 과 μ 의 관계식을 구할 수 있다.

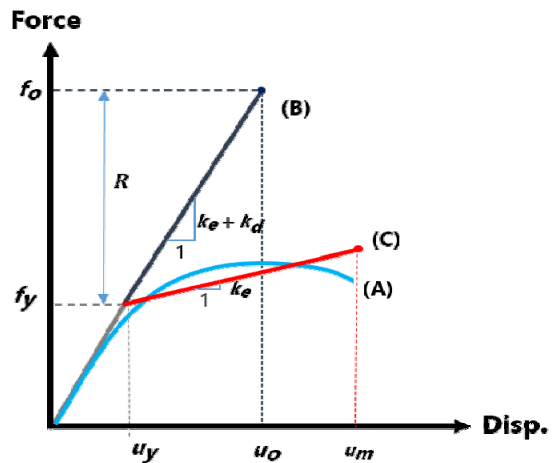


Fig. 10. Actual force-displacement relationship and idealized curve; (A) actual Behavior of the structure, (B) corresponding linear system, (C) bi-linear system

$$R^2 = \alpha(\mu - 1)^2 + 2(\mu - 1) + 1 \quad (16)$$

식 (16)으로부터, μ 는 다음과 같이 R 과 α 의 함수로 표현된다.

$$\mu = \frac{\alpha - 1 + \sqrt{\alpha R^2 - \alpha + 1}}{\alpha} \quad (17)$$

Fig. 11은 식(13)과 식(17)에 의해 산정된 R 과 α 의 변화에 따른 μ 의 변화를 보여준다. R 이 증가함에 따라 μ 가 증가하며, 그 효과는 α 가 작을수록 큰 것을 알 수 있다. 동일에너지 원리를 적용할 경우 R 과 α 가 감소하여 비선형성이 증가할수록 μ 는 R 보다 매우 큰 값을 가지게 된다는 것을 알 수 있다. 이는 최대비탄성변형 u_m 이 최대선형탄성변형 u_o 보다 매우 크다는 것을 의미한다.

단위질량을 가지고 감쇠비가 5%인 단자유도 구조물에 대하여 Table 1의 지속시간이 긴 일반적인 강진, Table 2에 제시된 지속시간이 짧은 충격파와 같은 지반가속도, 그리고 경주지진 중 가장 PGA가 큰 USN 관측소 NS 성분에 대해 시간이력해석을 수행하여 지속시간에 따른 비탄성변형 발생 경향을 분석하였다. 구조물의 주기는 장주기를 제외한 0.1초에서 0.5초까지 0.05초 간격의 주기를 고려하였다. R 은 1~8의 범위에서 1 간격으로, α 는 0~1의 범위에서 0.1 간격으로 설정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 12는 Table 1의 지속시간이 긴 일반적인 강진자료를 사용하여 구한 탄성최대변위 u_o 에 대한 비탄성최대변위 u_m 의 비를 보여준다. 하나의 지진이 두 가지 직교방향 성분으로 구성되어 있기 때문에 총 6개의 강진 시간이력해석을 수행한 후 평균을 취하여 구하였다. 주기가 0.5초에 가깝게 증가함에 따라 u_m/u_o 가 1에 가까워져 동일변형원리를 적용할 수 있다. 주기가 작을수록, 특히 주기가 0.3초보다 작은 극단주기 구조물의 경우 R 이 증가함에 따라 비탄성변형이 크게 증가한다. 주기가 짧아지고, 동일한 R 에 대하여 α 가 작을수록, 즉 비선형성이 증가할수록 탄성최대변형과 비탄성최대변형의 차이는 더욱 커지며, R 이 증가함에 따라 값의 편차도 증가한다. 이는 지속시간이 긴 강진에 대하여 단주기구조물에 동일변형의 원리를 사용하여 최대비탄성변형을 예측하거나, 요구연성도를 평가하는 것은 안전하지 못한 결과를 가져올 수 있음을 의미한다. 즉, 단주기구조물의 경우 기존 연구

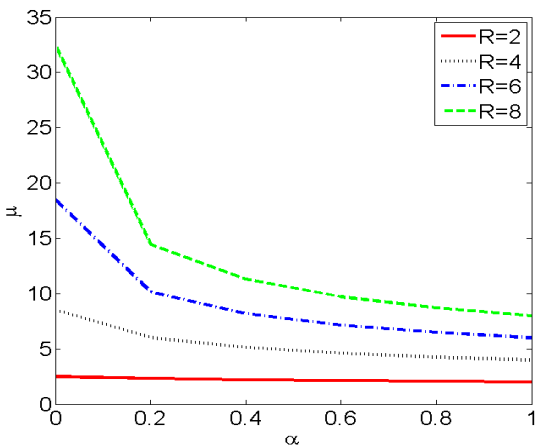


Fig. 11. Ductility demand of a bilinear system

와 같이 동일에너지 등의 원리를 적용하여 요구연성도를 크게 평가해야 한다.

Fig. 13은 경주지진 USN 관측소 자료를 사용하여 얻어진 탄성최대변위 u_o 에 대한 비탄성최대변위 u_m 의 비를 보여준다. Fig. 12와 비교할 때 u_m/u_o 의 크기가 크게 감소했음을 알 수 있다. 주기 0.1초를 제외하면 모든 R 에 대하여 대부분 1과 유사하거나 조금 작은 값을 가지고 있어, 동일변형의 원리를 가지고도 충분히 안전한 설계를 할 수 있음을 알 수 있다. 이는 강진지속시간이 짧아 비탄성변형이 많이 발생하지 않았음을 의미한다. 주기 0.1초의 경우에도 u_m/u_o 가 2를 넘지 않아 요구연성도의 크기가 강진지속시간이 큰 강진보다 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 14는 Table 2의 경주지진과 유사한 강진지속시간이 짧은 지진파들

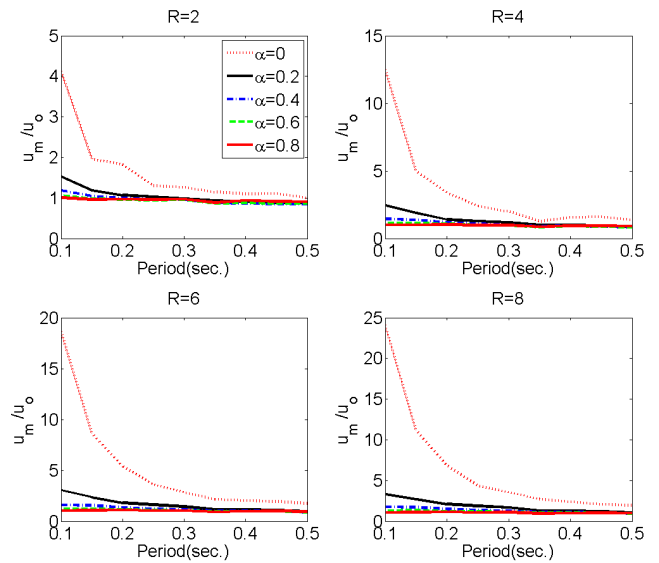


Fig. 12. Ratio of inelastic displacement to elastic displacement excited by Long-Duration earthquakes in Table 1

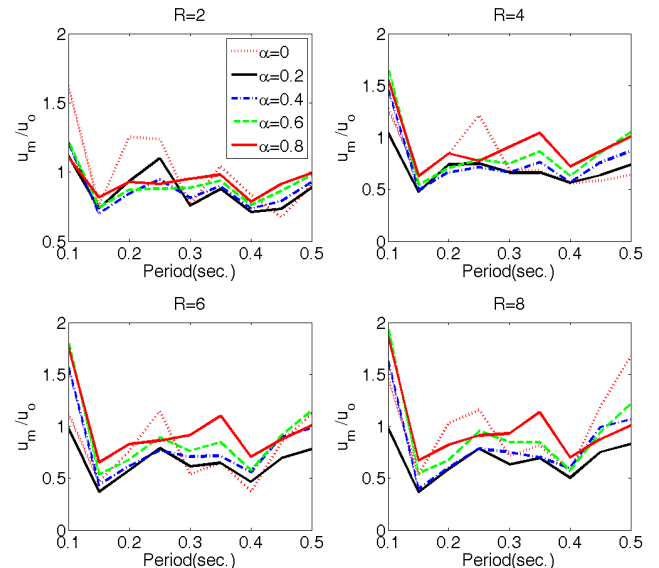


Fig. 13. Ratio of inelastic displacement to elastic displacement excited by Gyeong-ju Earthquake(2016, USN)

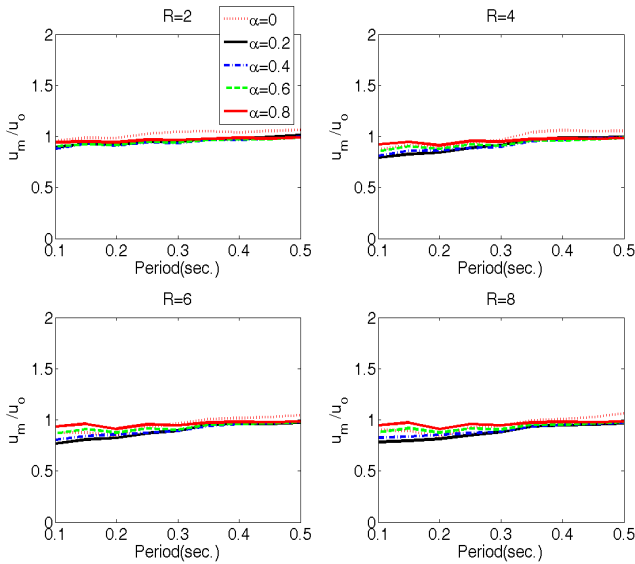


Fig. 14. Ratio of inelastic displacement to elastic displacement excited by Short-Duration Earthquakes in Table 2

에 대한 u_m/u_o 의 변화경향을 보여준다. 11개의 지진파의 X-Y성분을 사용하여 총 22개의 지진파에 대한 평균값을 구하였다. 주기 및 항복후 강성비, 그리고 강도감소계수에 관계없이 대부분 $u_m/u_o=1$ 의 값을 가지고 있어, 동일변형의 원리로 최대비탄성변형의 크기를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 경주지진의 시간영역 및 주파수 영역 특성을 고찰한 후, 경주지진과 같이 강진지속시간이 짧은 지진자료를 사용하여 이선형 이력 구조물에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 기존의 연구결과는 주기가 0.3초로 짧은 단주기 영역에서는 탄성최대변형보다 매우 큰 비탄성변형이 발생하는 것을 보여주며, 강진지속시간이 긴 일반적인 강진의 경우 이와 유사한 결과가 나타남을 확인하였다. 경주지진과 같이 강진지속시간이 10초 이하로 짧은 경우, 비탄성변형의 크기는 크게 발생하지 않으며 대부분 최대비탄성변형이 최대탄성변형의 크기와 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다. 비교적 높은 최대지반가속도를 가지는 경주지진의 피해가 작게 발생한 이유는 고주파수 성분이 커 지반가속도만 클 뿐 지반속도와 지반변위는 상대적으로 작아 지진에너지가 작았다는 사실과 함께 강진지속시간이 짧은 것도 그 요인 중 하나로 판단할 수 있다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2016년도 한국연구재단의 연구비 지원에 의해 수행되었음. (2015R1A2A1A10054506)

/ REFERENCES /

1. Park JH, Comparison of Waveform & Spectrum of Ground Accelerations Recorded Around the Epicenter of Gyeong-Ju Earthquakes, 2016 International Workshop and Conference Commemorating the 20th Anniversary of the Earthquake Engineering Society of Korea; Special Session for Gyeong-Ju Earthquake, c2016 Sep.
2. LEE CH, Damage Potentials of the 912 M 5.8 Gyeong-Ju Earthquake and Earthquake Engineering Implications, 2016 International Workshop and Conference Commemorating the 20th Anniversary of the Earthquake Engineering Society of Korea; Special Session for Gyeong-Ju Earthquake, c2016 Sep.
3. Shoji Y, Tanii K, Kamiyama M. The Duration and Amplitude Characteristics of Earthquake Ground Motions with Emphasis on Local Site Effects, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, c2004 Aug. 436 p.
4. Yun JK, Kim DS, Bang ES. Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (1) – Problem Statement of the Current Seismic Design Code. 2006;10(2):39-50.
5. Park HG, Kim DK, Lee KK, Kim DS. Nonlinear Seismic Response Analysis for Shallow Soft Soil Deposits, EESK J. Earthquake Eng. 2006;14(5):1-12.
6. Architectural Institute of Korea. Korea Building Design Code 2016 c2016.
7. Pacific Earthquake Engineering Research Center [Internet]. Available from: <http://peer.berkeley.edu>
8. Usgs [Internet]. Available from: www.usgs.gov
9. Internet Site for European Strong-Motion Data [Internet]. Available from: <http://www.isesd,hi.is/>
10. Naeim F, Alimoradi A, Pezeshk S. Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms, Earthquake Spectra, 2004; 20:413-426.
11. Newmark NM, Hall WJ. Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities, Report 46. Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, c1973, p.209-236.
12. Nassar AA, Krawinkler H. Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems. Report No.95. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University. c1991.
13. Miranda E. Site-Dependent Strength Reduction Factors, Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007;119(12):3503-3519.
14. Song JK. Evaluation of Inelastic Displacement Ratios for Smooth Hysteretic Behavior Systems, EESK J. Earthquake Eng. 2011;15(3):11-26.
15. Cho SG, Park WK, J YH. Comparative Evaluation of Formulas of Strength Reduction Factors for the Generation of an Inelastic Demand Spectrum, EESK J. Earthquake Eng. 2011;15(6): 33-34.
16. Chopra AK, Dynamics of Structures, 2nd Edition, Prentice Hall, c2000.
17. NEHRP. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis, procedures, FEMA 440, Part I (Provisions), and Part 2 (Commentary), c2005.