

# 다층 구조물과 등가 단자유도계의 에너지 요구량 비교

## Comparison of Energy Demand in Multi-Story Structures and Equivalent SDOF Systems

최현훈\*      원영섭\*\*      김진구\*\*\*  
Choi, Hyunhoon      Won, Yeongseop      Kim, Jinkoo

---

### ABSTRACT

In energy-based design, the structures are generally transformed into equivalent SDOF systems to obtain the input and the dissipated energy. In this study the energy demands in multi-story structures were compared with that of equivalent single degree of freedom systems to validate the transformation method. Three-, eight-, and twenty-story steel moment-resisting frames and buckling restrained braced frames are compared with those of equivalent single degree of freedom systems. Sixty earthquake ground motions recorded in different soil conditions were used to compute the input and hysteretic energy demands in model structures. According to the analysis results, in 3 and 8-story structures the hysteretic energy demands computed in the equivalent SDOF structures are compatible with those computed in the original MDOF structures, while in the 20-story structures the transformed equivalent structures underestimated the hysteretic energy demands.

---

### 1. 서론

지진에 의한 반복적인 비탄성 변형으로 인하여 구조물은 누적되는 피해를 입게된다. 현재 사용되는 강도에 근거한 설계방식과 근래 활발하게 연구가 진행되는 변위에 근거한 설계방법 등은 하중이나 응답의 최대 값을 이용하므로 누적되는 피해를 고려하지 못한다. 반면 에너지에 근거한 설계방식은 구조물에 입력되는 총 에너지의 양을 이용하기 때문에 누적되는 피해를 고려해서 설계할 수 있는 합리적인 차세대 내진설계 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 모멘트 저항골조(moment resisting frame, MRF), 비좌굴 가새골조(buckling restrained braced frame, BRBF)의 지진에 의한 에너지 요구량을 다자유도계와 등가 단자유도계에 서 비교하고 등가 단자유도계의 에너지 요구량을 다층 구조물에 적용시 그 적합성을 고찰하였다.

---

\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수

## 2. 에너지 방정식

지진에 의한 지반운동을 받는 단자유도계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_s(x, \dot{x}) = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서  $m, c, f_s(x, \dot{x})$ 는 구조물의 질량, 감쇠계수, 복원력을 나타내고,  $x, \ddot{x}_g$ 는 구조물 질량의 지반에 대한 상대변위와 지반의 가속도를 나타낸다. 식 (1)을 상대변위에 관해 적분을 하면 에너지 방정식을 구할 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$\int m\dot{x}dx + \int cxdx + \int f_s(x, \dot{x})dx = - \int m\ddot{x}_g dx \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} m\dot{x}^2 + \int c\dot{x}^2 dt + \int f_s(x, \dot{x})\dot{x}dt = - \int m\ddot{x}_g \dot{x}dt \quad (3)$$

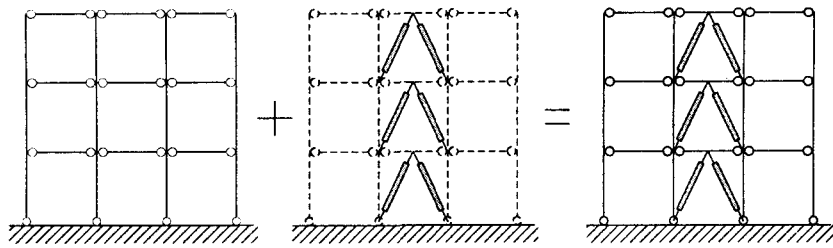
식 (2)를  $dx = \dot{x}dt$ 의 관계를 이용하여 풀어 얻은 식 (3)에서 첫 번째 항은 운동 에너지(kinetic energy,  $E_k$ )를 나타내고, 두 번째 항은 점성감쇠에 의하여 소산되는 감쇠에너지(damping energy,  $E_d$ )를 나타낸다. 세 번째 항은 회복 가능한 탄성 변형에너지(recoverable elastic strain energy,  $E_s$ )와 회복 불가능한 이력에너지(hysteretic energy,  $E_h$ )를 나타낸다. 그리고 우변 항은 지진에 의해 구조물에 입력되는 입력에너지(input energy,  $E_i$ )를 나타낸다.

$$E_k + E_d + E_s + E_h = E_i \quad (4)$$

비선형 구조물의 경우 대부분의 입력에너지가 감쇠에너지와 이력거동에 의한 이력에너지로 소산되는데 이중 감쇠에너지는 점성감쇠로 나타낼 수 있고 이력에너지는 골조의 이력거동에 의하여 발생하기 때문에 구조물의 설계에 있어서 더 의미있는 에너지는 이력에너지라고 할 수 있다. 더욱이 Akbas 등<sup>(2)</sup>의 연구에 의하면 지진하중의 크기가 작은 경우에는 대부분의 입력에너지가 감쇠에너지로 소산되지만 일정 크기 이상의 지진하중에 대하여는 입력에너지의 대부분이 이력에너지에 의하여 소산됨을 알 수 있다.

## 3. 비좌굴 가새골조

그림 1은 힌지로 연결되어 중력하중에 저항하는 주 구조체와 비좌굴 가새로 이루어진 횡력 저항시스템이 결합된 비좌굴 가새골조 시스템의 개념을 나타낸다. 보와 기둥은 힌지로 연결되어 있으므로 지진에 의하여 소성힌지가 발생하지 않으며, 지진에 의한 입력에너지는 가새의 이력 에너지로 소산된다. 따라서 모든 손상은 가새에 집중하게 되며, 중력하중을 부담하지 않는 가새는 쉽게 교체가 가능하므로 지진 이후 구조물의 관리 및 보수보강에 잇점이 있다.



(a) 중력하중 저항시스템 (b) 횡력 저항시스템 (c) 손상방지 비좌굴 가새골조 시스템  
그림 1. 손상방지 비좌굴 가새골조 시스템의 구성

#### 4. 예제 구조물과 지진하중

예제 구조물은 3경간과 5경간의 3층, 8층, 20층 철골 모멘트골조(MRF), 비좌굴 V가새가 설치된 비좌굴 가새골조(BRBF), 그리고 같은 구조물에서 보-기둥 접합부가 힌지로 접합된 비좌굴 가새골조(BRBF-H)로 모두 18개이다. 각 예제 구조물의 경간은 7.3m이고, 1층의 층고는 5.5m, 2층 이상은 모두 3.7m이다. 각 층별 무게는 3경간 구조물이 156.8 tonf, 5경간 구조물은 261.3 tonf이다. 구조물의 감쇠비는 2%로 가정하였다. 각 예제 구조물의 1차모드와 2차모드에 대한 주기, 질량 참여계수와 모드 참여계수는 표 1에 나타나 있다. 에너지 산정을 위한 지진하중은 SAC steel project에 사용된 LA 지역의 연암 지반, 연약 지반, 그리고 단층 근처에서 측정된 50년에 발생확률이 10%인 총 60개의 지진을 사용하였다.<sup>(3)</sup> 그림 2는 해석에 사용된 지진의 응답 스펙트럼을 나타내며, 다양한 특성의 지진기록이 반영되었음을 알 수 있다.

표 1. 예제 구조물의 동적특성  
(a) 3경간 구조물

유형		MRF			BRBF			BRBF-H		
		3층	8층	20층	3층	8층	20층	3층	8층	20층
주기 (초)	1차 모드	0.454	1.168	2.705	0.318	0.747	2.015	0.449	0.987	3.721
	2차 모드	0.138	0.420	0.946	0.108	0.275	0.652	0.155	0.361	0.942
질량 참여계수	1차 모드	0.931	0.829	0.771	0.924	0.809	0.719	0.908	0.790	0.648
	2차 모드	0.061	0.116	0.132	0.066	0.133	0.169	0.082	0.152	0.224
모드 참여계수	1차 모드	1.219	1.348	1.391	1.232	1.388	1.451	1.261	1.429	1.522
	2차 모드	0.302	0.509	0.580	0.307	0.562	0.686	0.334	0.615	0.812

(b) 5경간 구조물

유형		MRF			BRBF			BRBF-H		
		3층	8층	20층	3층	8층	20층	3층	8층	20층
주기 (초)	1차 모드	0.458	1.144	2.572	0.320	0.732	1.830	0.448	0.974	3.471
	2차 모드	0.140	0.413	0.915	0.109	0.274	0.622	0.155	0.365	0.911
질량 참여계수	1차 모드	0.932	0.829	0.783	0.925	0.812	0.740	0.909	0.791	0.655
	2차 모드	0.059	0.115	0.120	0.065	0.129	0.152	0.081	0.148	0.223
모드 참여계수	1차 모드	1.217	1.347	1.371	1.232	1.387	1.428	1.261	1.436	1.521
	2차 모드	0.299	0.508	0.556	0.305	0.564	0.658	0.332	0.625	0.802

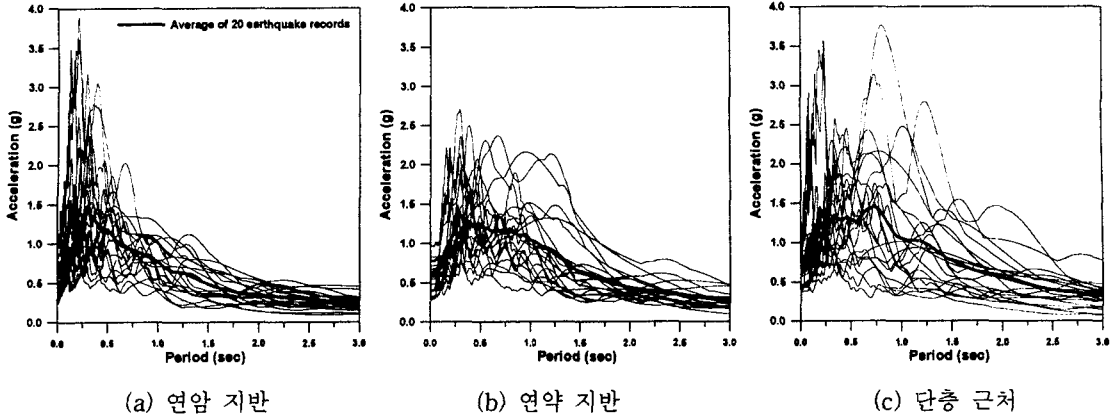


그림 2. 지반별 응답스펙트럼

## 5. 동가 단자유도계 시스템

본 연구에서는 ATC-40<sup>(4)</sup>에서 제시하고 있는 1차 모드만을 고려한 방법과 고차모드를 고려한 방법<sup>(5)</sup>을 이용하여 다자유도계 시스템을 동가 단자유도계로 변환하였다. 먼저 다층 건물에 식 (5)와 같이 1차 모드를 고려한 층지진 하중을 가하고 pushover 해석을 수행하여 밀면전단력( $V_b$ )에 대한 최상층 변위( $\Delta_t$ )의 곡선을 구한다. 이러한 곡선을 동가 단자유도 시스템의 힘-변위 곡선으로 변환하기 위하여 식 (6)의 관계를 이용한다.

$$F_i = \frac{m_i \phi_{i1}}{\sum m_i \phi_{i1}} V \quad (5)$$

$$S_f = \frac{V_b}{M_1^*} \quad S_d = \frac{\Delta_t}{\Gamma_1 \phi_{d1}} \quad (6)$$

여기서  $F_i$ ,  $m_i$ ,  $\phi_{i1}$ ,  $\phi_{d1}$ ,  $V$ 는  $i$ 층의 층지진하중, 층 질량, 1차 모드에서  $i$ 층과 최상층의 모드 형상계수와 설계 밀면전단력을 나타낸다.  $M_1^*$ 와  $\Gamma_1$ 은 1차 모드에 대한 유효모드질량과 모드참여계수이다. 같은 방법으로 고차모드의 효과를 고려한 경우는 다음 식 (7)~(9)를 이용한다.

$$F_i = \frac{m_i \bar{\phi}_i}{\sum m_i \bar{\phi}_i} V \quad (7)$$

$$\bar{\phi}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\phi_{ij} \Gamma_j)^2} \quad (8)$$

$$S_f = \frac{V_b}{M^*} \quad S_d = \frac{\Delta_t}{\Gamma \phi_t} \quad (9)$$

여기서  $\bar{\phi}_i$ ,  $\bar{M}^*$ ,  $\bar{\Gamma}$ 는 고차모드를 고려한 계수들이며  $n$ 은 고차모드의 최고차수이다. 표 2는 등가 단자유도계의 주기와 유효질량을 나타낸다. 식 (8)에서 모드는 5차까지 고려하였다.

표 2. 등가 단자유도계의 주기와 유효질량 (\* 표기: 고차모드 고려)

(a) 3경간 구조물

유형	MRF			BRBF			BRBF-H		
	3층	8층	20층*	3층	8층	20층*	3층	8층*	20층*
주기(초)	0.485	1.193	2.682	0.332	0.770	1.989	0.450	0.993	3.693
질량참여율(%)	93.1	82.9	86.0	92.4	80.9	85.1	90.8	87.4	84.6

(b) 5경간 구조물

유형	MRF			BRBF			BRBF-H		
	3층	8층	20층*	3층	8층	20층*	3층	8층*	20층*
주기(초)	0.592	1.125	2.533	0.325	0.730	1.823	0.462	0.945	3.438
질량참여율(%)	93.2	82.9	86.2	92.5	81.2	85.2	90.9	91.9	84.7

## 6. 에너지 요구량 비교

등가 단자유도계의 입력에너지와 이력에너지는 단자유도계 비선형 해석프로그램인 NONSPEC<sup>(6)</sup>을 이용하였고, 다층 구조물은 Drain 2D+<sup>(7)</sup>를 이용하여 산정하였다. 보와 기둥의 항복 후 강성비는 초기강성의 2%이고, 비좌굴 가새는 인장과 압축에서의 항복용력이 같고 항복 이후에 강성은 없는 것으로 가정하였다. 등가 단자유도계와 다자유도계의 입력에너지 비는 그림 3~5와 같다. 3층과 8층 모델의 입력에너지와 이력에너지는 등가 단자유도계로 비교적 잘 예측이 되었고 응답의 편차도 작았다. 그러나 20층 구조물은 응답의 편차를 뿐만 아니라 다자유도계의 응답을 제대로 예측하지 못하였다.

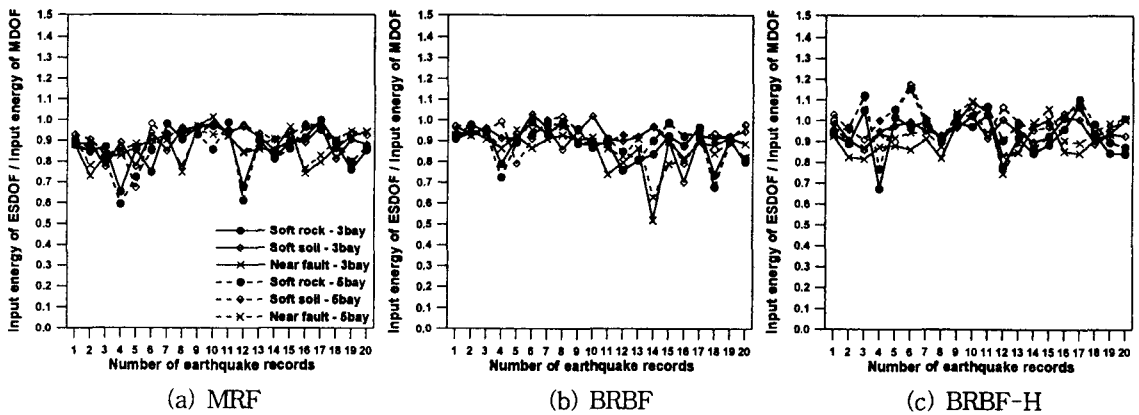


그림 3. 등가 단자유도계와 8층 구조물 입력에너지 비

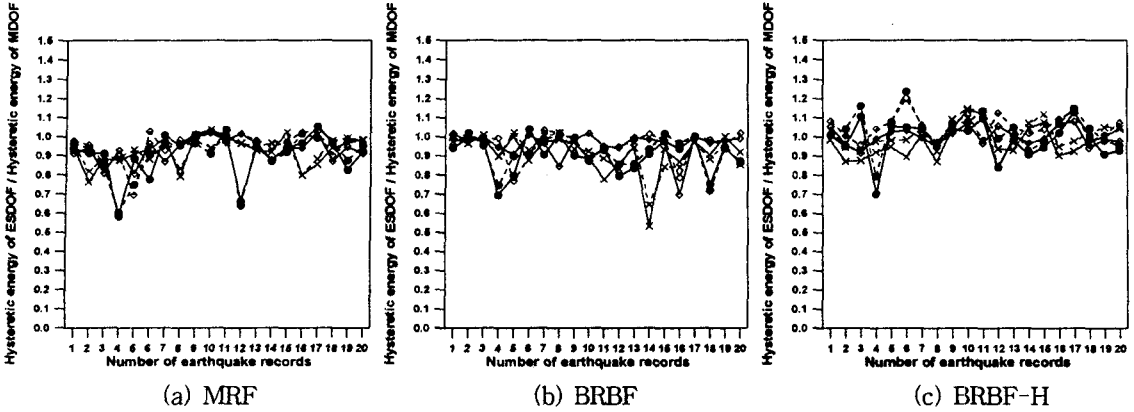


그림 4. 등가 단자유도계와 8층 구조물 입력에너지 비

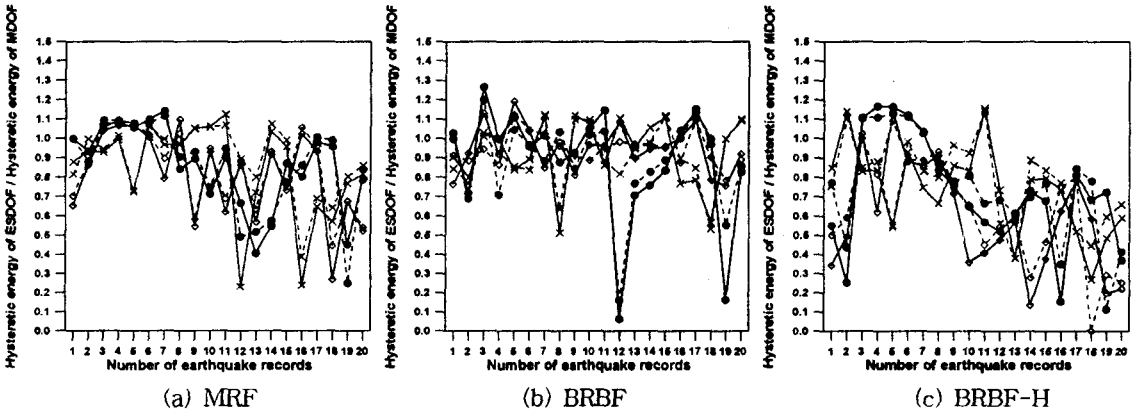


그림 5. 등가 단자유도계와 20층 구조물 입력에너지 비

3층 구조물의 경우 입력에너지의 평균 오차는 최대 13.1%(연약지반, 5경간 MRF), 입력에너지는 15.6%(연약지반, 5경간 MRF)이다. 8층 구조물의 경우 입력에너지는 14.8%(연암지반, 5경간 MRF), 입력에너지는 9.8%(연암지반, 5경간 MRF)의 평균 오차를 보인다. 20층 구조물의 경우 입력에너지는 49.4%(연약지반, 3경간 BRBF-H), 입력에너지는 41.4%(연약지반, 3경간 BRBF-H)의 평균 오차를 보인다. 결과에서 알 수 있듯이 층수가 높아질수록 고차모드의 영향으로 등가 단자유도계와 다자유도계의 에너지 차이는 커진다. 특히 20층 BRBF-H의 경우는 49.4%로 가장 큰 오차를 보여 등가 단자유도계로 응답을 예측하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 표 3은 등가 단자유도계와 3경간 5경간의 다층 구조물의 평균 에너지비를 나타낸다.

표 3. 등가 단자유도계와 다자유도계 에너지비의 평균

(a)입력에너지비의 평균 (3경간)

지반조건	MRF			BRBF			BRBF-H		
	3층	8층	20층	3층	8층	20층	3층	8층	20층
soft rock	0.985	0.865	0.780	1.008	0.884	0.838	0.994	0.925	0.610
soft soil	1.000	0.895	0.735	0.992	0.925	0.869	1.008	0.950	0.506
near fault	0.978	0.869	0.777	0.958	0.865	0.807	0.974	0.912	0.592

(b)이력에너지비의 평균 (3경간)

지반조건	MRF			BRBF			BRBF-H		
	3층	8층	20층	3층	8층	20층	3층	8층	20층
soft rock	1.007	0.907	0.859	1.008	0.905	0.879	1.026	0.986	0.724
soft soil	1.017	0.934	0.811	1.001	0.958	0.948	1.031	1.004	0.586
near fault	1.007	0.925	0.834	0.977	0.914	0.928	0.994	0.976	0.734

(c)입력에너지비의 평균 (5경간)

지반조건	MRF			BRBF			BRBF-H		
	3층	8층	20층	3층	8층	20층	3층	8층	20층
soft rock	1.034	0.852	0.788	0.995	0.894	0.856	1.001	0.979	0.652
soft soil	1.131	0.914	0.757	0.970	0.930	0.899	1.021	1.001	0.561
near fault	0.996	0.877	0.784	0.954	0.878	0.850	0.988	0.948	0.634

(d)이력에너지비의 평균 (5경간)

지반조건	MRF			BRBF			BRBF-H		
	3층	8층	20층	3층	8층	20층	3층	8층	20층
soft rock	1.048	0.902	0.858	0.999	0.921	0.881	1.031	1.039	0.754
soft soil	1.156	0.956	0.840	0.983	0.959	0.946	1.043	1.054	0.627
near fault	1.032	0.928	0.892	0.972	0.919	0.915	1.007	1.013	0.772

## 7. 결론

본 연구에서는 철골 모멘트 저항골조와 비좌굴 가새골조의 지진에 의한 에너지 요구량을 다자유도계와 등가 단자유도계에서 비교하고, 등가 단자유도계에서 구한 에너지 요구량을 다층 구조물의 설계에 적용할 때 그 적합성을 고찰하였다. 3층과 8층의 예제 구조물은 3경간과 5경간 모두 등가 단자유도계와 다자유도계의 입력에너지와 이력에너지가 지반조건에 관계없이 유사한 결과를 보였으며, 응답의 편차 역시 전체적으로 작은 경향을 보였다. 그러나 20층 구조물의 경우 등가 단자유도계에 의한 에너지가 다자유도계에 비해 최대 49.4%까지 작게 평가 되었다. 시스템별로는 힌지로 연결된 비좌굴 가새골조가 가장 큰 편차를 보였다. 결과에서 알 수 있듯이 저층과 중층 구조물의 경우 등가 단자유도계로 다자유도계의 에너지 요구량을 평가하는 것은 큰 문제가 없으나 20층과 같이 고차모드의 영향이 큰 고층 구조물의 경우는 등가 단자유도계의 에너지 요구량만으로 다층 구조물을 설계하는 것이 타당하지 않으며 그 신뢰성이 떨어진다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00025-0) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Uang, C.M., and Bertero, V.V., "Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design,"

- Report No. UCB/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1988.1.
2. Akbas, B., Shen, J., and Hao, H., "Energy approach in performance-based seismic design of steel moment resisting frames for basic safety objective," *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 10, 2001, pp. 193~217.2.
  3. Somerville, P., Smith, H., Puriyamurthala, S., and Sun, J., "Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project," SAC Joint Venture, SAC/BD-97/04, 1997.
  4. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
  5. Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C., and Madan, A., "IDARC 2D version 4.0: A computer program for the inelastic damage analysis of buildings," Technical Report NCEER-96-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1996.
  6. Mahin, S.A. and Lin, J., "Inelastic response spectra for single degree of freedom systems," Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1983.
  7. Tsai, K.C., and Li, J.W., "DRAIN2D+, A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R86-07, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1997.