

다층 비좌굴 가새골조와 등가 단자유도계의 에너지 요구량의 비교

Comparison of Energy Demand in Multi-Story Buckling Restrained Braced Frame and Equivalent SDOF System

김진구*

원영섭*

Kim, Jin-Koo

Won, Yeong-Seop

(논문접수일 : 2003년 1월 24일 ; 심사종료일 : 2003년 6월 10일)

요 지

비선형 정적해석 및 에너지를 이용한 설계방법에서는 구조물을 등가의 단자유도계로 치환하여 해석하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 지진하중에 의한 3층, 8층, 20층 철골 모멘트저항골조(MRF), 비좌굴 가새골조(BRBF)와 힌지접합 비좌굴 가새골조(DTBF) 구조물의 에너지 요구량을 등가 단자유도계 시스템(ESDOF)의 에너지 요구량과 비교하여 등가단자유도계로 치환하는 방법의 타당성을 검토하였다. 입력에너지와 이력에너지를 산정하기 위하여 연암 지반, 연약한 토사, 단층 근처의 지반에서 계측된 60개의 지진을 사용하였으며, 모드 질량계수가 0.8보다 작은 경우 ESDOF로 변환할 때 고차모드의 효과를 고려하였다. 연구 결과에 따르면 3층과 8층 MRF와 DTBF에서의 이력에너지와 입력에너지는 ESDOF의 해석결과와 비교적 잘 일치하였다. 그러나 20층 BRBF에서는 ESDOF의 결과가 본 구조물의 결과를 과소평가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 이력에너지, 지진 입력에너지, 비좌굴 가새골조, 등가 단자유도계

Abstract

In equivalent static nonlinear analysis and in energy-based design, the structures are generally transformed into an equivalent SDOF system. In this study the seismic energy demands in multi story structures, such as three-, eight-, and twenty-story steel moment-resisting frames(MRF), buckling restrained braced frames(BRBF) and a damage tolerant braced frame(DTBF), are compared with those of equivalent single degree of freedom(ESDOF) systems. Sixty earthquake ground motions recorded in different soil conditions, which are soft rock, soft soil, and near fault, were used to compute the input and hysteretic energy demands in model structures. In case the modal mass coefficient is less than 0.8, the effects of higher modes are considered in the process of converting into ESDOF. According to the analysis results, the hysteretic and input energies obtained from 3 story and 8 story MRF and DTBF agreed well with the results from analysis of equivalent SDOF systems. However in the 20 story BRBF the results from ESDOF underestimated those obtained from the original structures.

Keywords : hysteretic energy, seismic input energy, buckling restrained braced frame, equivalent SDOF

1. 서 론

탄성해석법에 근거한 기존 내진설계기준은 설계지진 이상의 지진에 대한 구조물의 내진성능을 적절하게 예측할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 최근 건물의 사용기간 동안에 발생 가능한 지진하중에 대하여 구조물의 거동을 보다

잘 예측하고, 지진이 발생하였을 때 구조물의 성능을 명확하게 보장하도록 하는 성능에 기초한 내진설계(performance based seismic design)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 성능에 기초한 내진설계의 방법론으로 구조물의 비탄성 거동까지 고려한 변위설계법(displacement based design)과 지진이 발생하는 동안 입력되는

* 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수

전화: 031-290-7563; Fax: 031-290-7570

E-mail: jinkoo@yurim.skku.ac.kr

* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

* 이 논문에 대한 토론을 2003년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2003년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

에너지와 구조물의 이력거동에 의하여 소산되는 이력 에너지를 이용하는 에너지설계법(energy based design) 등을 들 수 있다. 특히 이력에너지를 이용한 설계방법은 지진하중의 반복되는 이력특성을 반영하는 구조물의 손상 지수로 활용할 수 있으므로 합리적인 차세대 내진설계방법으로 간주되고 있다.

현재 변위설계법에 대한 연구는 광범위하게 진행되어 구체적이고 체계적인 설계절차가 제안되었다.^{1),2)} 그러나 구조물의 설계와 해석에 에너지의 개념이 Housner³⁾에 의해 도입된 이후 많은 연구자들에 의하여 구조물에 입력되는 에너지와 소산되는 에너지에 대한 연구^{4)~6)}가 수행되었지만 이러한 연구의 대부분은 단자유도계 시스템에 국한되었다.

본 연구에서는 비좌굴 가새가 설치된 철골조 구조물의 지진에 의한 에너지 요구량을 다자유도계와 등가 단자유도계에서 비교하고 등가 단자유도계의 에너지 요구량을 다층 구조물에 적용시 그 적합성을 고찰하였다. 먼저 저층과 중층 그리고 고층 모멘트 저항골조(moment-resisting frame, MRF), 비좌굴 가새골조(buckling restrained braced frame, BRBF), 보와 기둥의 접합부를 힌지로 접합하고 비좌굴 가새를 설치한 손상방지 비좌굴 가새골조(damage tolerant braced frame, DTBF)에서의 입력 에너지와 이력에너지를 산정하였다. 에너지 산정을 위한 지진하중은 SAC steel project⁷⁾에서 제시하고 있는 LA 지역의 연암 지반, 연약한 토사 지반, 그리고 단층근처에서 측정된 50년에 발생확률이 10%인 총 60개의 지진을 사용하였다. 다자유도계에 입력된 에너지와 이력에너지를 요구량을 등가 단자유도계 시스템 (equivalent single degree of freedom system)의 에너지량과 비교하였다.

2. 에너지 방정식

지진 지반운동을 받는 단자유도계의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 m , c , f_s 는 구조물의 질량, 감쇠, 복원력을 나타내고, \ddot{g} 는 지반의 가속도를 나타낸다. 식(1)을 상대변위 x 에 대하여 적분을 하면 에너지 방정식을 구할 수 있다.⁸⁾

$$\int m\dot{x}dx + \int cxdx + \int f_s xdx = - \int m\dot{g}dx \quad (2)$$

식(2)에서 첫 번째 항은 지반에 대한 상대운동과 관련된

질량의 운동에너지(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(irrecoverable hysteretic energy, E_h)로 구성된 구조물에 흡수된 에너지(absorbed energy, E_a)이다. 그리고 우변 항은 지진에 의해 구조물에 입력되는 입력에너지(input energy, E_i)를 나타낸다. 이러한 에너지 관계를 정리하면 다음 식과 같다.

$$E_k + E_d + E_s + E_h = E_i \quad (3)$$

비선형 구조물의 경우 대부분의 입력에너지가 감쇠에너지와 이력거동에 의한 이력에너지로 소산된다. 특히 부가적인 감쇠 장치가 설치되지 않은 경우 이력에너지에 의해 입력에너지의 대부분을 소산하기 때문에 비선형 구조물의 거동을 예측하고 항복 이후의 거동을 파악하기 위하여 이력에너지 요구량은 매우 중요하다.

3. 비좌굴 가새가 설치된 손상방지 가새골조

3.1 비좌굴 가새의 특성

좌굴을 방지한 비좌굴 가새는 철골 가새를 철골 튜브속에 배치하고 콘크리트 등으로 충전함으로써, 기존 철골 모멘트골조에 설치하여 내진성능을 획기적으로 향상할 수 있는 방법이다. 그림 1과 2는 기존에 개발되어 있는 비좌굴 가새의 형상 및 구조, 축력과 변위의 이력곡선을 나타내며, 기존의 연구에 따르면 압축력을 받을 경우에도 좌굴에 대한 저항성능이 뛰어나고 안정적인 이력 거동을 하는 것을 알 수 있다.^{9)~11)}

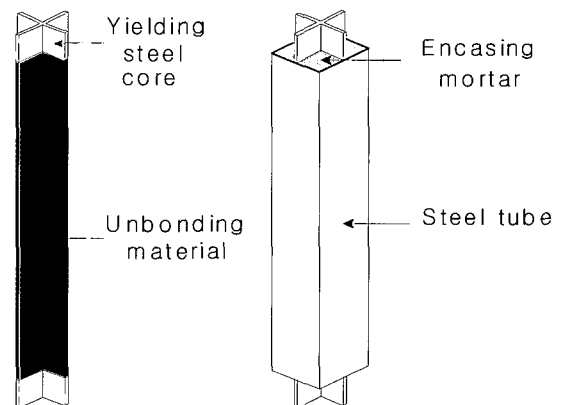


그림 1 비좌굴 가새의 형상 및 구조

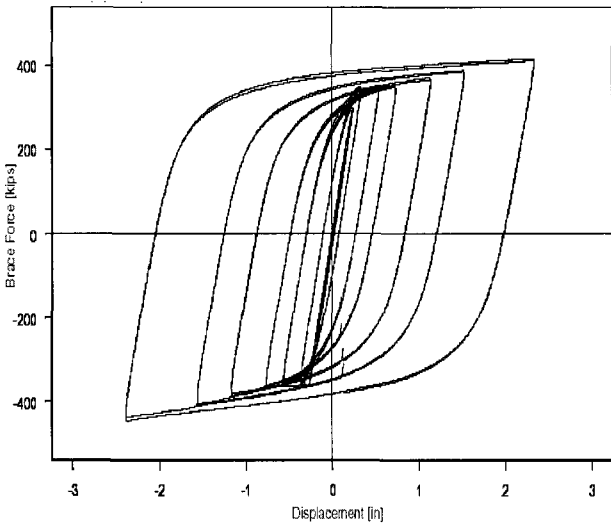


그림 2 비좌굴 가새의 이력곡선(Clark, 1999)⁹⁾

3.2 손상방지 비좌굴 가새골조

그림 3은 손상방지 비좌굴 가새골조 시스템의 개념을 나타내며, 힌지로 연결되어 중력하중에 저항하는 주 구조체와 비좌굴 가새로 이루어진 횡력 저항시스템이 결합된 형태이다. 보와 기둥은 힌지로 연결되어 있으므로 지진에 의하여 소성힌지가 전혀 발생하지 않으며, 지진에 의한 입력 에너지는 가새의 이력에너지로 소산된다. 따라서 모든 손상은 가새에 집중하게 되며, 중력하중을 부담하지 않는 가새는 쉽게 교체가 가능하므로 지진 이후 구조물의 관리 및 보수보강에 큰 잇점이 있다. 또한 중력 및 횡력저항 시스템이 서로 독립적으로 분리되어 있으므로, 구조설계 과정을 단순화할 수 있다.

4. 등가 단자유도계 시스템

다자유도계의 특성을 나타낼 수 있는 등가 단자유도계로

의 변환 방법 중 본 연구에서는 ATC-40¹²⁾에서 제시하고 있는 1차 모드만을 고려한 방법과 Valles 등¹³⁾이 제안한 고차모드를 고려한 방법을 이용하였다. 먼저 다층 건물에 식(4)와 같이 1차 모드를 고려한 층지진 하중을 가하고 pushover 해석을 수행하여 밀면전단력(V_b)에 대한 최상층 변위(Δ_t)의 곡선을 구한다. 이러한 곡선을 등가의 단자유도 시스템의 힘-변위 곡선으로 변환하기 위하여 식(5)의 관계를 이용한다.

$$F_i = \frac{m_i \phi_{1i}}{\sum m_i \phi_{1i}} V \quad (4)$$

$$S_f = \frac{V_b}{M_1^*} \quad S_d = \frac{\Delta_t}{\Gamma_1 \phi_{1t}} \quad (5)$$

여기서 F_i , m_i , ϕ_{1i} , ϕ_{1t} , V 는 층의 층지진하중, 층 질량, 1차 모드에서 i 층과 최상층의 모드 형상계수와 설계 밀면전단력을 나타낸다. M_1^* 와 Γ_1 은 1차 모드에 대한 유효 모드질량과 모드참여계수이다. 같은 방법으로 고차모드의 효과를 고려한 경우는 다음 식(6)~(8)을 이용한다.

$$F_i = \frac{m_i \bar{\phi}_i}{\sum m_i \bar{\phi}_i} V \quad (6)$$

$$\bar{\phi}_i = \sqrt{\sum_j (\phi_{ij} \Gamma_j)^2} \quad (7)$$

$$S_f = \frac{V_b}{M^*} \quad S_d = \frac{\Delta_t}{\Gamma \bar{\phi}_t} \quad (8)$$

여기서 $\bar{\phi}_i$, M^* , Γ 는 고차모드를 고려한 계수들이다.

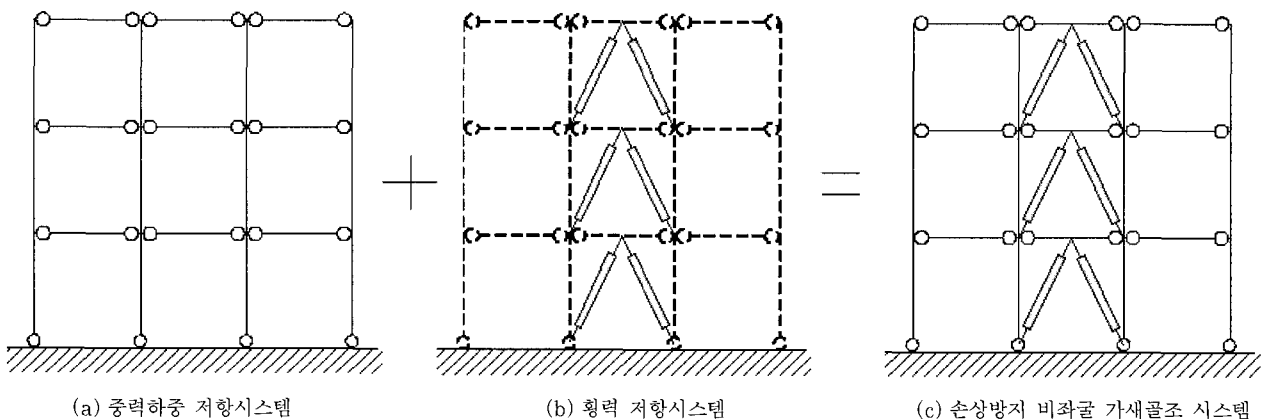


그림 3 손상방지 비좌굴 가새골조 시스템의 구성

5. 예제 구조물과 지진하중

예제 구조물은 3경간 3층, 8층, 20층의 철골 모멘트골조 (MRF), 역V형 비좌굴 가새가 설치된 비좌굴 가새골조 (BRBF), 그리고 같은 구조물에서 보-기둥 접합부가 힌지로 접합된 손상방지 비좌굴 가새골조 (DTBF) 등 모두 9개이다. 각 예제구조물의 경간은 7.3m이고, 1층의 층고는

5.5m, 2층 이후의 층고는 모두 3.7m이다. 모든 층의 무게는 156.8tonf이고 구조물의 감쇠비는 2%로 가정하였다. 각 예제 구조물의 가새 단면적은 그림 4와 같고 보-기둥 부재크기는 그림 5에 나타내었다. 모드별 주기, 질량참여계수와 모드 참여계수는 표 1과 같다. 각 구조물의 1차 모드형상을 나타낸 그림 6에 따르면, DTBF의 경우 다른 구조물보다 형상이 직선에 가까움을 알 수 있으며, 20층

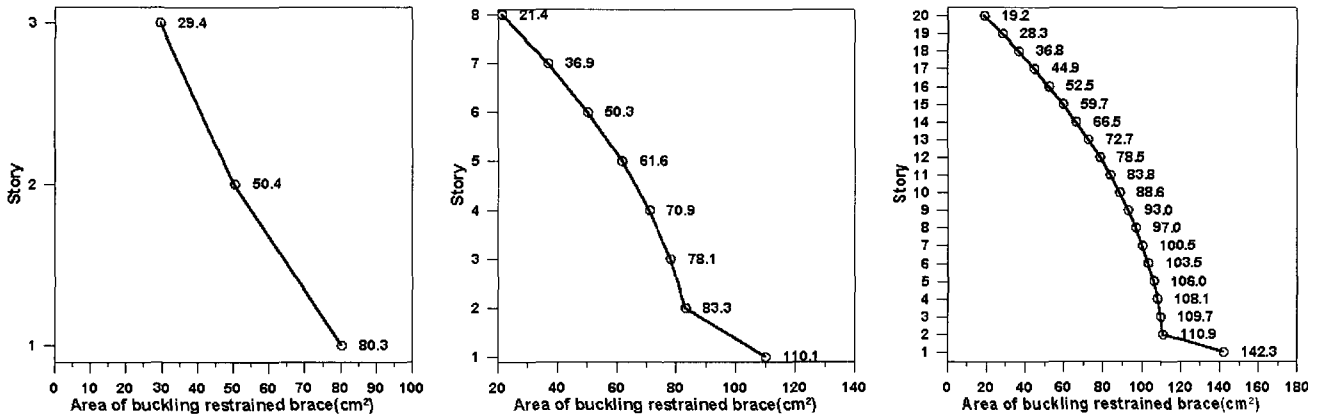


그림 4 비좌굴 가새의 단면적

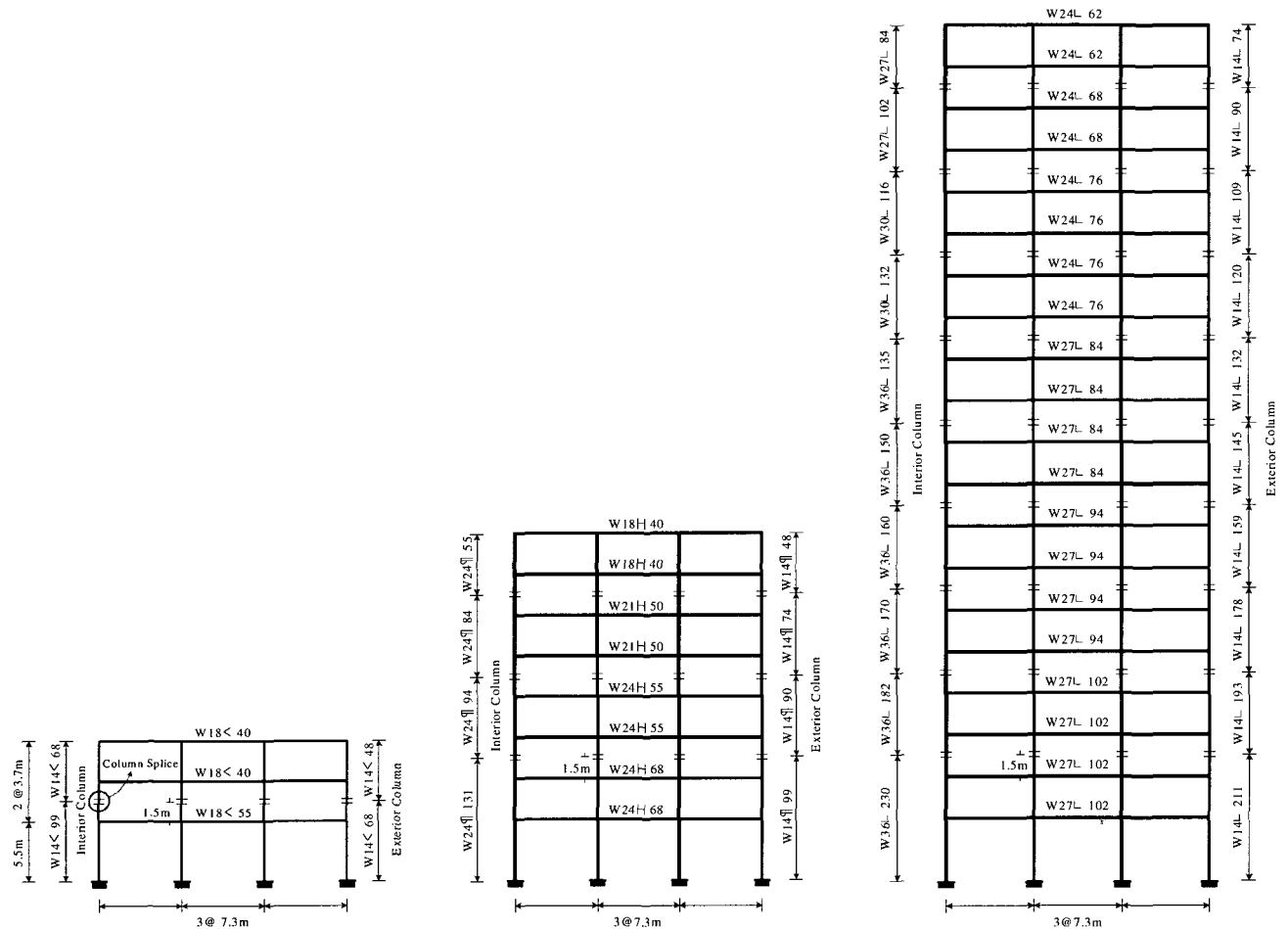


그림 5 예제 구조물

표 1 예제 구조물의 동적특성

유형		모멘트 골조			비좌굴 가새골조			손상방지 비좌굴 가새골조		
		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

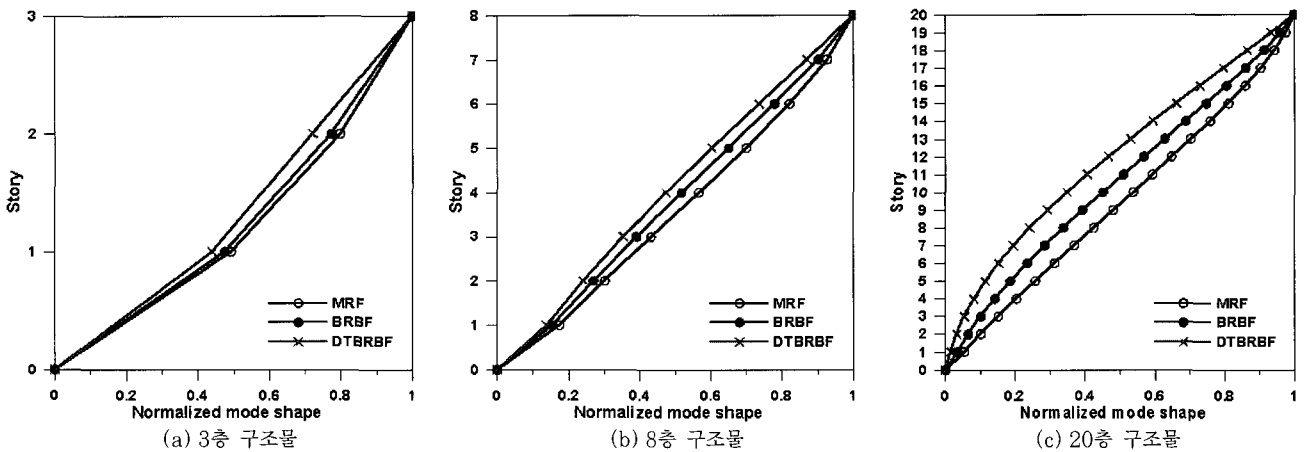


그림 6 각 구조물의 1차 모드형상

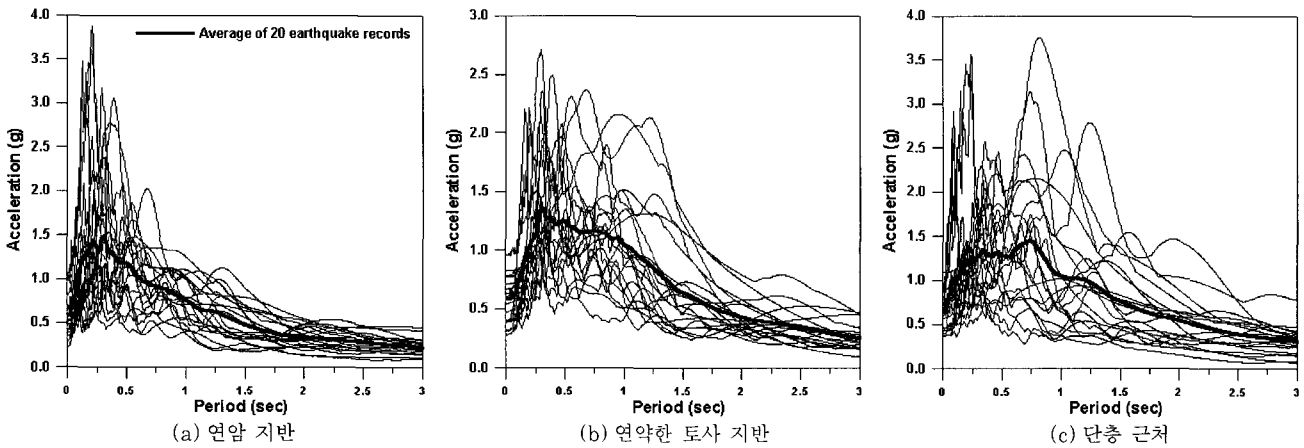


그림 7 지반 별 응답스펙트럼

DTBF 모드형상은 전단벽의 변형형상과 유사하다.

해석에 사용된 지진하중은 SAC steel project에서 제시하고 있는 지진기록을 사용하였다. 이 project에서는 LA지역의 연암 지반(soft rock), 연약한 토사 지반(soft soil), 단층 근처(near fault)에서 50년에 발생확률이 10%인 각 지반별로 20개의 지진을 제시하고 있다. 그림 7에 나타난 각 지진의 응답스펙트럼에 따르면 다양한 특성을 가진 지진기록이 반영되었음을 알 수 있다.

6. 다자유도계와 등가 단자유도계의 에너지 요구량의 비교

6.1 등가 단자유도계로의 변환

지진에 의하여 구조물에 입력되는 에너지와 소산되는 에너지에 대한 기존 연구는 대부분 단자유도계 시스템에서 수행되었다. 그러나 단자유도계 시스템의 거동은 다자유도계 시스템과 다르기 때문에 기존의 연구 결과를 다자유도

계에 직접적으로 적용하기에는 부적합하다. 따라서 MRF와 BRBF 그리고 DTBF를 등가의 단자유도계로 치환한 다음 단자유도계 비선형 해석프로그램인 NONSPEC¹⁵⁾을 이용하여 단자유도계의 입력에너지와 이력에너지를 구하였다. 다층 구조물에서 입력에너지와 이력에너지를 산정하기 위하여 비탄성 동적해석 프로그램인 Drain-2D+¹⁴⁾를 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 보와 기둥의 단부에서만 소성힌지가 발생하고 항복후 강성비는 초기강성의 2%이고 비좌굴 가새는 인장과 압축에서의 항복응력이 같고 항복 이후에 강성은 없는 것으로 가정하였다. pushover 해석에 의한 각 구조물의 밀면전단력과 최상층 변위곡선은 그림 8과 같다. 9개의 예제구조물 중 표 1에서 볼 수 있듯이 1차 모드의 질량참여율이 80% 이하인 20층 모멘트 골조와 비좌굴 가새골조, 8층과 20층 손상방지 가새골조는 5차 모드까지 고려하여 등가의 단자유도계로 치

환하여 해석을 수행하였다. 치환한 등가 단자유도계 시스템의 주기와 유효질량은 표 2와 같다.

6.2 입력에너지와 이력에너지의 비교

등가 단자유도계와 다자유도계에서 입력에너지의 비와 이력에너지의 비는 그림 9~14와 같다. 저층인 3층과 8층 모멘트 골조와 비좌굴 가새골조, 손상방지 가새골조의 입력에너지와 이력에너지는 등가 단자유도계로 비교적 잘 예측이 되었고 응답의 편차도 작았다. 그러나 20층 구조물은 응답의 편차가 클 뿐만 아니라 다자유도계의 응답을 제대로 예측하지 못하였다. 3층 구조물의 경우 입력에너지의 평균 오차는 최대 4%(단층 근처, 비좌굴 가새골조)이고 이력에너지의 경우는 3%(연약 지반, 손상방지 가새골조)이다. 8층 구조물의 경우 연약 지반의 모멘트 골조에서 입

표 2 등가 단자유도계의 주기와 유효질량 (*표기 : 고차모드를 고려)

유형	모멘트 골조			비좌굴 가새골조			손상방지 비좌굴 가새골조		
	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

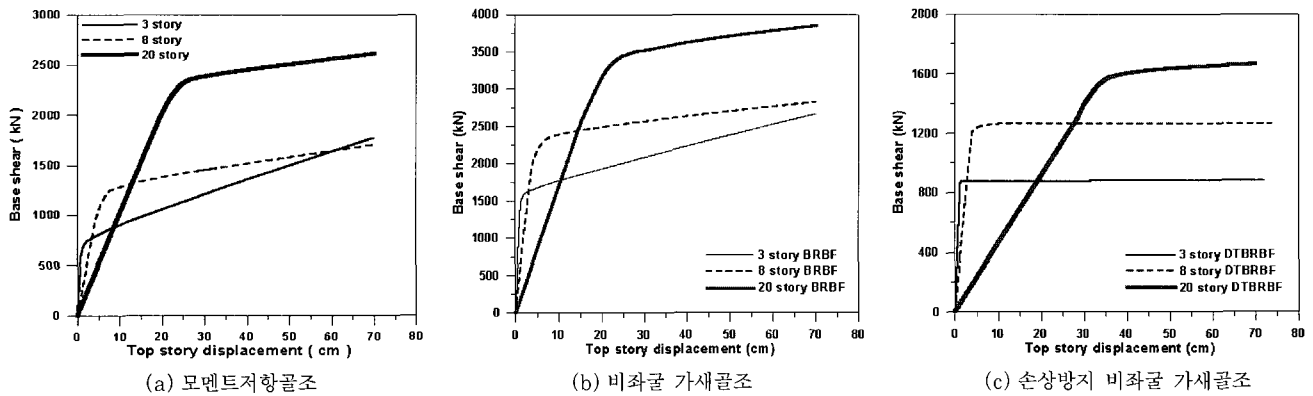


그림 8 밀면전단력-최상층 변위 곡선

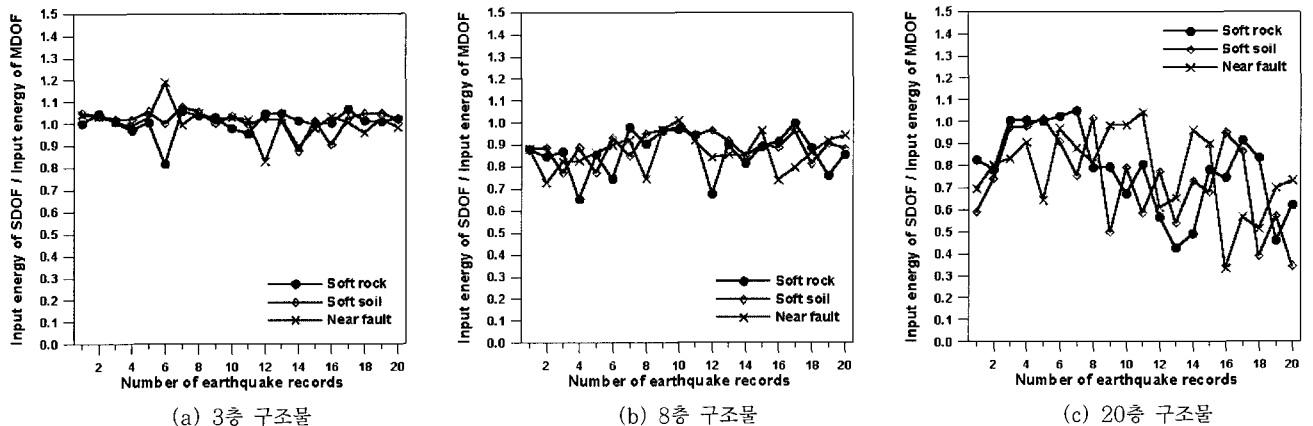


그림 9 등가 단자유도계와 다자유도계 입력에너지의 비(모멘트 골조)

력에너지는 13%, 이력에너지는 최대 9%까지 평균 오차를 나타내었다. 20층 모멘트 골조는 연약한 지반에 대하여 26%의 평균 오차를 보였고 이력에너지는 18%의 오차를 보였다. 20층 비좌굴 가새골조의 경우 입력에너지는 최대 19%, 이력에너지는 12%의 오차가 발생하였다. 그러나 20층 손상방지 가새골조의 경우 입력에너지는 최대 49%, 이력에너지는 최대 41%의 오차를 보여 표 1에서와 같이

고차모드의 효과가 매우 컸기 때문에 등가 단자유도계로 응답을 예측하는데 한계가 있음을 나타낸다. 또한 응답의 편차도 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 단자유도계 시스템에서 산정한 입력에너지와 이력 에너지를 이용하여 다자유도계의 설계를 수행하기 위해서는 이러한 효과를 고려하여야 할 것이다. 즉 단자유도계에서 산정한 에너지에 다층 구조물의 영향을 반영할 수 있는 계수를 곱해서 보정함으

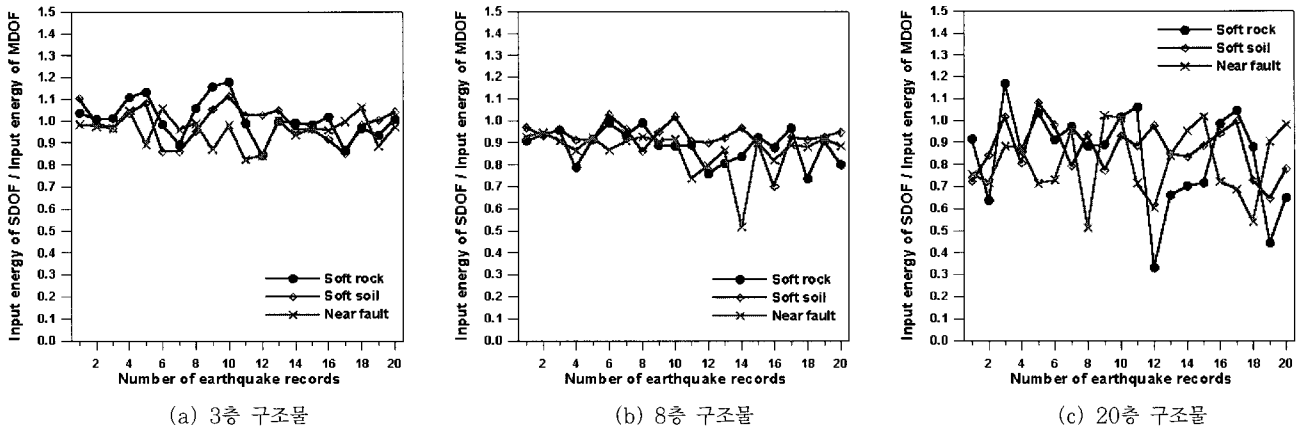


그림 10 등가 단자유도계와 다자유도계 입력에너지의 비(비좌굴 가새골조)

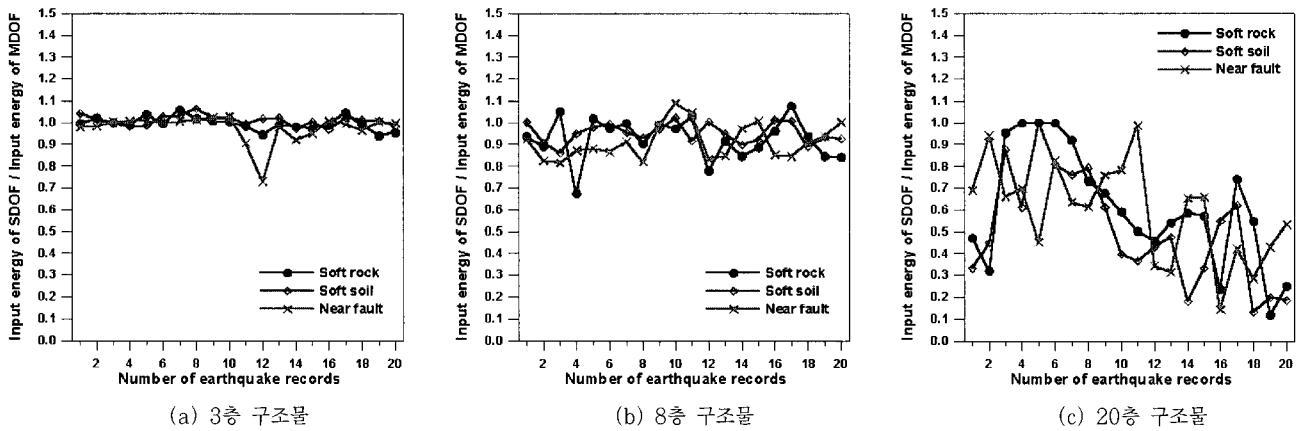


그림 11 등가 단자유도계와 다자유도계 입력에너지의 비(손상방지 비좌굴 가새골조)

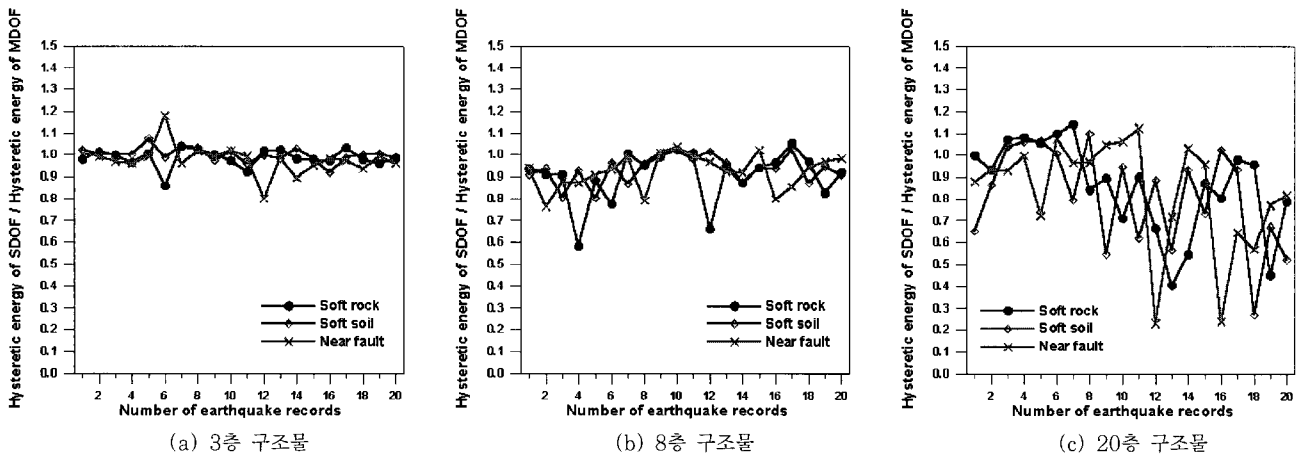


그림 12 등가 단자유도계와 다자유도계 이력에너지의 비(모멘트 골조)

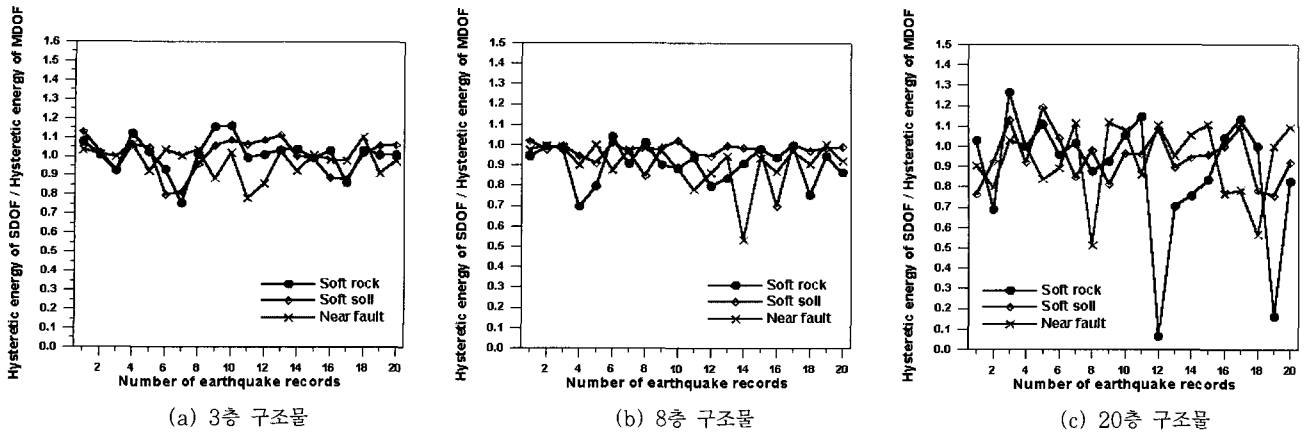


그림 13 등가 단자유도계와 다자유도계 이력에너지의 비(비좌굴 가새골조)

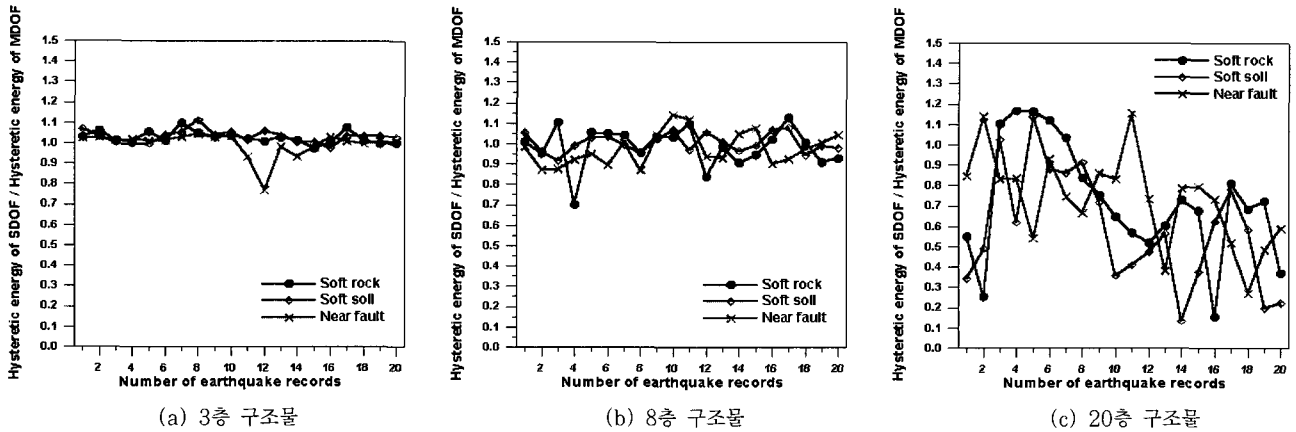


그림 14 등가 단자유도계와 다자유도계 이력에너지의 비(손상방지 비좌굴 가새골조)

표 3 등가단자유도계와 다자유도계 에너지비의 평균

(a) 입력에너지비의 평균

지반조건	모멘트저항골조			비좌굴 가새골조			손상방지 가새골조		
	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

지반조건	모멘트저항골조			비좌굴 가새골조			손상방지 가새골조		
	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

로써 해결할 수 있을 것이다. 지반 조건별 응답의 분포를 보면 3층과 8층 구조물의 경우는 단층 근처 지반의 응답의 편차가 다른 경우보다 컸다. 이것은 그림 8의 응답스펙트럼에서 볼 수 있듯이 단층근처의 응답스펙트럼이 주기에 따라 불규칙하기 때문인 것으로 사료된다. 각 예제 구조물의 지반 종류별 등가 단자유도계와 다자유도계의 입력에너지

비와 이력에너지비의 평균값은 표 3에 나타난 바와 같다.

7. 결 론

등가에너지 개념을 적용한 설계법이나 에너지 스펙트럼을 이용한 설계법은 단자유도계 시스템에 근거한 설계법의

로 이를 다자유도계의 설계에 적용할 때는 단자유도계의 응답을 보정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 철골 모멘트저항골조, 비좌굴 가새골조와 보와 기둥이 힌지로 접합된 손상방지 가새골조 구조물의 지진에 의한 에너지 요구량을 다자유도계와 등가 단자유도계에서 비교하고, 등가 단자유도계에서 구한 에너지 요구량을 다층 구조물의 설계에 적용할 때 그 적합성을 고찰하였다. 해설결과에 의하면 3층과 8층 예제구조물은 등가 단자유도계에 의한 입력에너지와 이력에너지는 다자유도계의 에너지와 지반 조건에 관계없이 유사한 결과를 보였으며, 그 응답의 편차도 매우 작았다. 그러나 20층 구조물의 경우 등가 단자유도계에 의한 에너지가 모멘트저항골조는 22~26%, 비좌굴 가새골조는 16~21%정도 작게 평가되었고, 손상방지 비좌굴 가새골조는 40~52%정도 작게 나타났다. 또한 응답의 편차도 매우 커서 등가 단자유도계에 의한 결과를 다층 구조물에 반영하기에는 그 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 추후에는 고층 구조물의 경우 다층구조물의 에너지를 적절하게 반영할 수 있는 방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- Chopra, A. K., and Goel, R. K., "Direct displacement-based design: Use of inelastic vs. elastic design spectra", *Earthquake Spectra*, Vol.17, No.1, 2001, pp.47~64
- Priestley, M. J. N., and Kowalsky, M. J., "Direct displacement-based seismic design of concrete buildings", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol.33, No.4, 2000, pp.421~444
- Housner, George, Limit design of structures to resist earthquakes, *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, California, 1956
- Zahrah, T., and Hall, J., "Earthquake energy absorption in SDOF structures", *Journal of Structural Engineering*, Vol.110, No.8, 1984, pp.1757~1772
- 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
- Chou, C.C., and Uang, C.M., "Evaluation of site-specific energy demand for building structures", *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, 2002
- 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
- Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995
- Huang, Y.H., Wada, A., Sugihara, H., Narikawa, M., Takeuchi, T., and Iwata, M., Seismic performance of moment resistant steel frame with hysteretic damper, *Proceedings of the Third International Conference STESSA*, Montreal, Canada, 2000
- Yamaguchi, M., Yamada, S., Wada, A., Ogihara, M., Narikawa, M., Takeuchi, T., and Mameda, Y., Earthquake resistant performance of moment resistant steel frames with damper. *Proceedings of the Third International Conference STESSA*, Montreal, Canada, 2000
- Clark, P.W., Aiken, I.D., Tajirian, F.F., Kasai, K., Ko, E., and Kimura, I., Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, *Int. Post-SmiRT Conf. Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*, Cheju, South Korea, 1999
- ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996
- 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 En-

- gineering Research, State University of New York at Buffalo, 1996
14. Mahin, S.A. and Lin, J., "Inelastic response spectra for single degree of freedom systems", Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1983
15. 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