

비선형 동적 해석을 통한 X형 가새골조 내 가새 부재의 에너지 소산

Energy Dissipation Demand of Braces Using Non-linear Dynamic Analyses of X-Braced Frame

이 강 민¹⁾
Lee, Kangmin

요 약 : 철골가새골조 내 가새 부재의 에너지 소산 등의 이력 특성을 조사하기 위하여 비선형 구조해석 프로그램인 DRAIN-2DX를 이용한 단층 구조물의 동적 해석을 수행하였다. 가새 부재의 세장비(KL/r) 및 구조물 반응 수정 계수(R)을 변수로 15개의 가새 부재가 설계되었고 인공지진을 포함 6개의 지진기록을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 총 90개의 동적 해석 및 해석결과 비교 분석을 통하여 다음의 사실을 알 수 있었다. (1) 큰 반응 수정 계수(R)로 설계된 철골가새골조 내의 가새 부재가 구조물이 우수한 연성 거동을 통하여 큰 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖게 되리라 예상과는 달리 해석 결과 큰 R값으로 설계된 가새 부재가 좌굴 이후 심한 강도 저하를 보이고 작은 가새 부재력으로 설계되기 때문에 오히려 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)가 작았다. (2) 해석 결과 및 Lee and Bruneau (2002)에 의해 수집된 실험 결과들을 근거로한 실험 자료, 모두 세장한 가새 부재가 대부분의 경우 더 큰 연성을 갖기는 하지만 작은 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖고 있었다.

ABSTRACT : The response of single story buildings and other case studies were investigated to observe trends and develop a better understanding of the impact of some design parameters on the seismic response of Concentrically Braced Frames (CBF). While many parameters are known to influence the behavior of braced frames, the focus of this study was mostly on quantifying energy dissipation in compression and its effectiveness on seismic performance. Based on dynamic analyses of single story-braced frame and case studies, a bracing member designed with bigger R and larger KL/r was found to result in lower normalized cumulative energy ratio in both cases.

핵심 용어 : 지진 응답, 철골가새골조, 비선형 동적해석, 에너지 소산, 압축 가새 부재, 세장비, 반응 수정 계수, DRAIN-2DX

KEYWORDS : Seismic response, Concentrically braced frame, Non-linear dynamic analysis, Energy dissipation, Compression member, Slenderness ratio, R factor, DRAIN-2DX

1. 개 요

최근 철골가새골조와 관련하여 기존에 수행된 실험 자료들의 조사 연구가 Lee and Bruneau (2002)에 의해 수행되었다. 이 연구에서는 기존 실험 자료들을 근거로 인장 및 압축의 반복하중을 받는 가새 부재들의 세장비(KL/r) 및 부재 단면 형상에 따른 에너지 소산 및 좌굴 이후 부재력 감소에 대한 비교 분석이 수행되었다.

본 연구에서는 기존 실험 자료를 바탕으로 한 Lee and Bruneau (2002)의 연구 결과와의 비교를 위하여, X형 가새 형상을 갖는 철골가새 골조 단층 구조물의 비선형 동적 해

석이 수행되었다. 여러 가지 구조물 반응 수정 계수 (Structural Response Modification Factor, R)²⁾ 및 부재 세장비 (KL/r)를 변수로 한 구조 해석이 수행되었다. 또한 이들 변수들이 골조 내 가새 부재의 에너지 소산 요구에 미치는 영향들에 대한 고찰이 수행되었고 해석 결과로부터의 에너지 소산을 기존 실험 자료들로부터의 에너지 소산 능력과 비교하였다. 본 연구로부터의 결과들이 향후 유사한 연구의 기초 자료로 사용되어질 수 있도록 모든 설계 자료 및 해석 결과 (하중-변위 이력곡선) 등의 자료들을 world wide web (<http://civil.eng.buffalo.edu/un/kangmin>)에 올려놓았다.

1) 정회원, 뉴욕주립대학교 토목공학과 대학원 박사과정
(Tel. +1-716-645-2114, Fax. +1-716-645-3733, E-mail:kli10@acsu.buffalo.edu)

본 논문에 대한 토의를 2004년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

2. 비선형 동적 해석

2.1 해석 대상 구조물

본 연구의 구조 해석에 사용된 건물은 38m×38m의 평면을 갖는 단층 철골 구조물이다. 건물의 층고는 3.8m이고 가새 부재는 7.6m의 경간을 갖는 건물의 외곽에 설치되었다. 해석 대상 건물의 구조 평면 및 입면을 그림 1에 나타내었다.

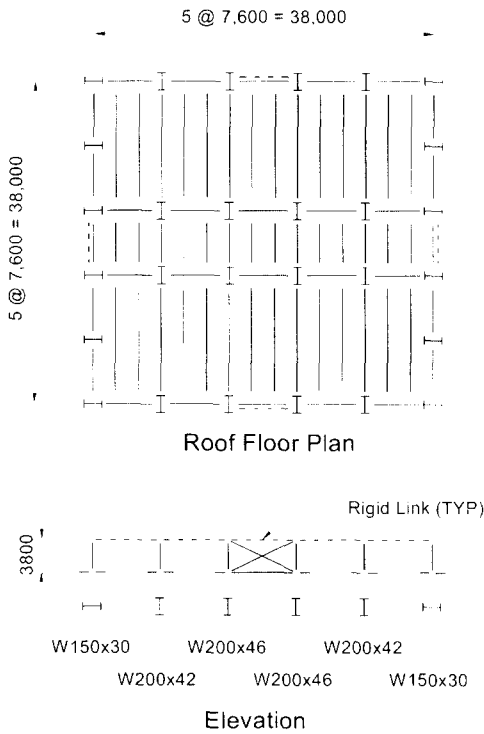


그림 1. 해석 대상 건물의 평면 및 입면

구조물에서 기둥은 1.0 kPa의 활하중과 1.48 kPa의 사하중을 받도록 설계되었다. 건물 상부의 보들은 활하중 작용시 구조물 경간의 양쪽 기둥이 같은 변위를 갖도록 Rigid Beam 요소를 사용하였다. 가새 부재는 지진하중만을 저항하도록 Uniform Building Code(UBC, 1994)에 따라 설계되었다.

$$V = C_s W \quad (1)$$

여기서 V 는 밑면 전단력, W 는 건물의 총 자중(1339 kN)이고 C_s 는 지진 계수로 다음과 같이 정의된다.

$$C_s = \frac{C_e}{R_w} \quad (2)$$

여기에서, R_w 는 구조물의 반응 수정 계수이고 C_e 는 탄성 지진 응답 계수이며 다음과 같이 정의된다.

$$C_e = ZIC \quad (3)$$

여기에서, Z 는 지진 지역 계수, I 는 구조물의 중요도 계수(본 연구에서는 1.0을 사용)이고 C 는 상수로써 다음과 같이 정의된다.

$$C = \frac{1.25S}{T_1^{2.3}} \quad (4)$$

여기에서, S 는 지반 계수(본 연구에서는 1.0을 사용)이고 T_1 은 구조물의 기본 주기(본 연구에서는 구조물의 동적 해석으로부터의 결과 사용)이다.

2.2 가새 부재 설계

본 연구에서는 1장에서 언급한 바와 같이 다양한 세장비(KL/r) 및 R 값을 적용하여 가새 부재를 설계하였다. 세장비는 50, 100 및 150을 각각 적용하였고 1, 2, 4, 6 및 8의 R 값을 적용하여 가새 부재를 설계하였다(현행, 미국내 AISC 내진 설계 기준(AISC, 1997)에서는 철골가새골조의 R 값을 6으로 규정). 결과적으로 모두 15개의 가새 부재들이 설계되었다. 이들 각각의 부재들은 모두 6종류의 지진 기록을 적용하여 구조 해석되었다. 따라서 모두 90종의 비선형 동적 해석이 수행되었다. 동적 해석에 사용된 지진을 표 1에 요약하였다.

표 1. 구조 해석에 사용된 지진 기록

Event	Station	Comp.	Scaled			Scale Factor
			PHA (mm/s ²)	PHA (g)	PHV (mm/s)	
1940 Imperial Valley	El Centro	S00E	2406.8	0.25	3.3	0.70
1971 San Fernando	Hollywood Storage, L.A.	N90E	1962.8	0.20	2.1	0.95
1971 San Fernando	Hollywood Storage, L.A.	S00W	2282.9	0.23	1.7	1.36
1949 Western Washington	Olympia, Highway Test lab.	N04W	1598.1	0.16	2.1	0.99
1983 Coalinga aftershock	Oil Fields Fire Station	N270	2538.6	0.26	1.6	1.20
Simulated Motion, $M_w = 7.2$	R=70km	-	2271.4	0.23	1.9	2.12

주) (1) PHA : Peak Horizontal Acceleration

주) (2) PHV : Peak Horizontal Velocity

가새 부재들은 다음과 같은 과정을 거쳐 설계되었으며 그림 2와 3에 이 과정을 나타내었다.

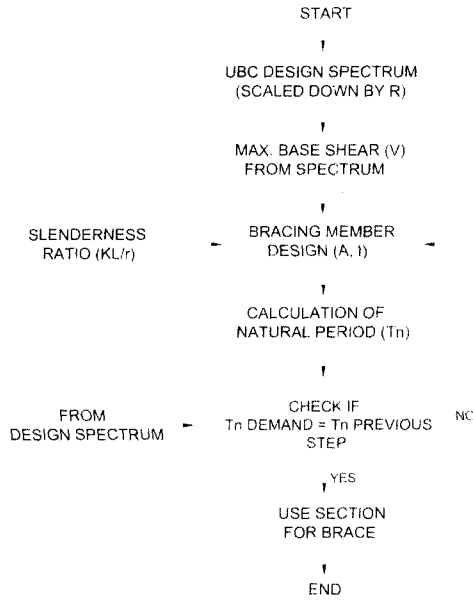


그림 2. 가새 부재의 설계

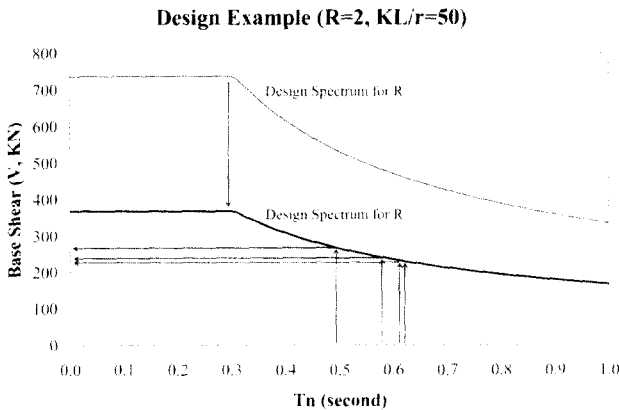


그림 3. 가새 부재 설계의 예

- (a) 그림 3과 같이 UBC 탄성 설계 스펙트럼을 설계에 적용하려고 하는 R값으로 나눈다.
- (b) 이로부터 초기 설계에 적용할 밑면 전단력 V 값을 구한다.
- (c) (b)에서 계산된 밑면 전단력 V 및 적용 하려는 세장비 (KL/r)로부터 가새 부재의 단면 크기(단면적 A와 단면 이차 모멘트 I)를 결정한다.
- (d) 설계된 가새 부재를 갖는 가새골조의 고유주기 T_n을 구한다.

- (e) 설계 스펙트럼에서 (d)로부터 계산된 구조물의 주기 T_n에 상응하는 밑면 전단력 V를 구한다. 여기서 결정된 밑면 전단력 V가 (b)에서 결정된 값과 일치하지 않을 경우, 이 밑면 전단력 V를 (c) 단계부터 다시 적용한다. (c)-(e) 과정을 반복하여 설계 조건(R, KL/r)을 만족하는 가새를 찾는다.

본 연구에서 설계된 가새 단면 형상은 각형강관인데, 이는 기존 가새 관련 실험 자료를 조사한 Lee and Bruneau (2002)의 연구에서 각형강관이 가장 많이 사용되었음을 보여주었기 때문이다. 각형강관의 폭, 두께 등의 부재 크기는 가새에 작용하는 부재력과 완전하게 일치하는 값들을 Spreadsheet 프로그램의 Solver 기능을 이용하여 찾았기 때문에 현행 규준에서 제시하고 있는 가용한 각형강관 부재들의 단면과는 일치하지 않는 가상의 부재들이다. 자세한 가새 부재 설계를 위한 계산 Spreadsheet는 1절에서 언급한 world wide web에 올려놓았다.

위에서 설명한 과정에 따라 설계된 X형 가새골조의 고유주기는 0.17초부터 1.76초 까지 비교적 큰 분포를 보였는데, 이는 동일한 골조 내에서 다양한 R값으로 설계된 가새 부재들의 단면 크기에 따라 상응하는 가새골조의 강성이 달라지기 때문이다. 작은 R 값으로 설계된 가새골조가 상대적으로 큰 가새 부재를 갖게 되고 결과적으로 짧은 고유주기를 갖게 된다.

2.3 가새골조 해석 모델

가새 부재들의 압축 좌굴 이후 단계적인 부재력 감소 및 소성흔치 생성에 의한 부재의 잔류 변형 등과 같은 비선형 이력 거동을 예측하기 위한 해석 모델들이 기존의 여러 연구자들에 의해 개발되었다.

일반적으로 가새 부재의 해석 모델은 (1)유한요소 모델 (finite element model), (2)실험 모델(pheno-menological 또는 empirical model) (3)물리적 모델 (physical model) 등 세 가지로 분류된다.

유한요소 모델은 가새 부재를 아주 작은 요소(segment)로 나누어 해석함으로써 가장 실제에 가까운 정확한 비선형 거동을 예측하는 모델이다.

가새 부재의 이력 거동을 예측하는 실험 모델은 Jain 등 (1977), Ikeda 등 (1984), Lee and Goel (1987), 그리고 Hassan and Goel (1991)에 의해 개발되었다. 이 모델은 가새 부재의 실험결과로부터의 축 하중-변위 이력선도의 인장 및 압축의 한 사이클을 몇 개의 구간으로 세분화하여 단순화된 실험적 규칙을 적용하여 가새 부재의 이력 거

동을 예측하는 모델이다. 이 모델은 해석 시 계산 과정을 단 순화하기 위하여 이력선도의 각 요소들을 선형으로 연결한다. 그림 4는 Hassan and Goel (1991)의 실험 모델을 보여준다.

가새 부재의 물리적 거동을 기초로 한 모델(물리적 모델, physical model)은 Nonaka (1987), Gugerli and Goel (1982), 그리고 Ikeda and Mahin (1984) 등에 의해 개발되었다. 또한 Taddei (1995)는 Ikeda and Mahin의 DRAIN-2DX 모델을 이용한 해석 연구를 수행하였다. 이 모델은 철골 가새 부재의 압축력(P)-압축 변위(δ) 관계를 표현하는 이론 식을 기초로 하여 만들어 졌다. 이 모델은 가새 부재의 압축 및 인장으로 구성되는 한 사이클을 6개의 영역으로 구분하고 있는데 이를 그림 5에 그리고 6에는 이 모델의 기하학적 특성을 나타내었다.

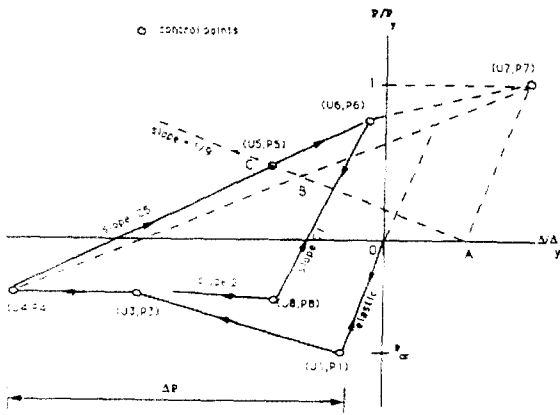


그림 4. Hassan and Goel의 실험 모델 (phenomenological model) (1991)의 이력 규칙

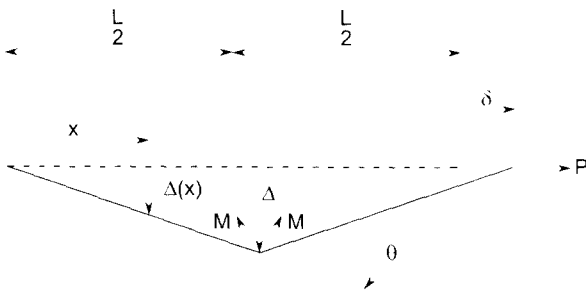


그림 5. Member geometry of refined physical theory model (Ikeda and Mahin 1984)

본 연구에서는 물리적 모델(physical model)을 비선형 동적 해석에 사용하였는데, 이는 물리적 모델이 실험 모델(phenomenological model)보다 많은 해석 시간을 요구하지만 이 모델이 가새 부재의 비탄성 이력거동을 더 유사하게

예측하기 때문에 이 모델을 이용하였다.

2.4 DRAIN-2DX를 이용한 비선형 동적해석

본 연구에서는 여섯 개의 지진기록을 비선형 동적 해석에 사용하였다. 이 여섯 개의 지진 특성들은 표 1에 요약되었다. 이 지진 기록들을 이용해 5%의 감쇠를 갖는 응답 스펙트럼을 만들었으며, 이들은 0초에서 3초까지의 구조물의 주기 안에서 UBC 규준의 지진구역 2B의 스펙트럼에 가깝게 맞추기 위해 최소자승법을 이용하여 스케일링되었고 이를 그림 7에 나타내었다.

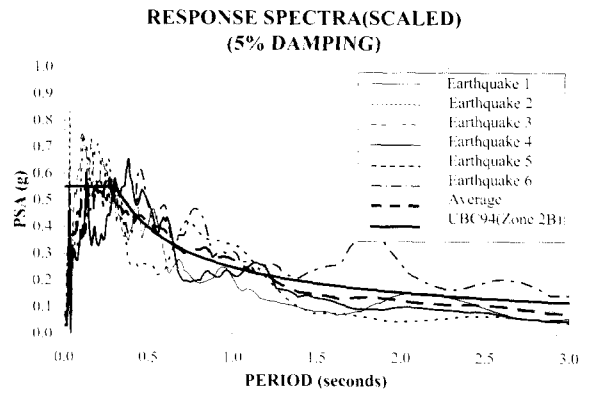


그림 6. Scaled response spectra

본 연구에서는 비선형 구조해석 프로그램인 DRAIN-2DX (Prakash and Powell 1993)를 사용해 동적 해석을 수행하였으며, 가새골조 내 가새 부재는 Ikeda and Mahin 모델 (Element No. 5)을 사용하였다. P- δ 효과를 해석에 고려하였으며 5%의 감쇠를 해석에 사용하였다.

3. 해석 결과의 고찰

본 절에서는 앞 절에서 수행한 해석 결과에 대하여 검토하고 또한 기존 가새 관련 실험 자료를 조사한 Lee and Bruneau (2002)의 연구 결과들과의 비교가 이루어진다. 특히, 이력 에너지 소산 관련 결과들을 가새 부재의 세장비 (KI/r)와 반응 수정 계수 R과 관련하여 검토하였다.

3.1 축적된 에너지 비($\Sigma E_r/E_r$)

기존 가새 관련 실험 자료를 조사한 Lee and Bruneau (2002)의 연구 결과로부터의 축적된 에너지 비($\Sigma E_r/E_r$)를 표 2에 그리고 본 해석 연구로부터의 결과를 표 3에 정리하였다.

여기서 가새 부재의 압축 에너지(E_c)는 각 경우의 결과들을 서로 비교하고 또한 기존 실험 결과에 관한 Lee and Bruneau (2002)의 결과들과 비교하기 위하여 Lee and Bruneau가 사용한 방법을 적용하여 그림 7과 같이 일반화 시켰다.

표 2. 기존 실험 결과로부터의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)
Lee and Bruneau (2002)

세장비	KL/r = 50 (0 - 75)	KL/r = 100 (75 - 125)	KL/r = 150 (125 - 200)
평균	3.79	2.56	2.28
최대	8.22	6.11	2.28
최소	1.70	0.72	2.28

표 3. 본 연구 해석 결과로부터의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)

세장비	KL/r = 50				KL/r = 150		
	R=2	R=4	R=6	R=8	R=4	R=6	R=8
평균	3.92	3.83	3.23	2.70	2.46	1.73	1.60
최대	7.65	6.12	5.71	4.52	3.65	3.55	3.06
최소	1.15	1.84	1.47	1.22	1.45	0.69	0.83

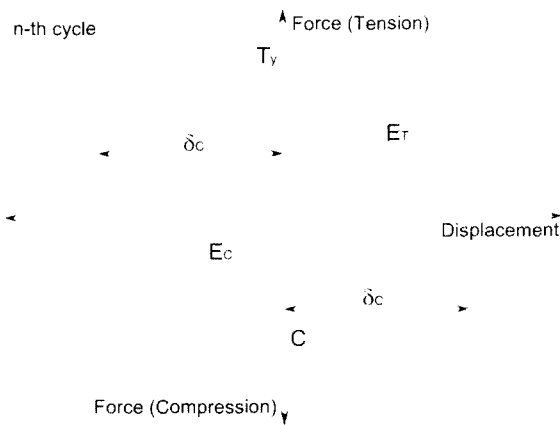


그림 7. 일반화된 압축 에너지 비, E_c/E_T
(Lee and Bruneau 2002)

표 3의 해석 결과 중, 작은 R값과 큰 세장비(KL/r)를 갖고 설계된 가새 부재의 해석 결과는 그림 8에서 정의된 OA와 AB의 탄성 구간 내에 있어 에너지를 계산할 수 없었다.

이들 결과들을 그림 8에 다시 정리하였는데, 그림에서 음영으로 표시된 영역은 Lee and Bruneau (2002)의 기존 실험 자료에 관한 연구로부터 얻은 결과 중 세장비가 50 ($0 < KL/r < 75$)인 경우를 나타내고 세장비가 150 ($125 < KL/r < 200$)인 경우 해당하는 자료가 하나밖에 없어 단선으로 표시되었다.

그림에서 보는 바와 같이 R값이 커질수록 축적 에너지 비

($\Sigma E_c/E_T$)는 감소함을 알 수 있고 해석 결과로부터의 축적 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)는 기존 실험 자료들이 분포된 영역 안에 있음을 알 수 있다. 또한 그림 8는 세장비(KL/r)가 커질수록 축적 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)가 작아지는 경향을 보여주는데 이는 큰 세장비를 갖는 가새 부재들이 작은 세장비를 갖는 가새 부재들에 비해 작은 비선형 에너지를 요구함을 의미한다.

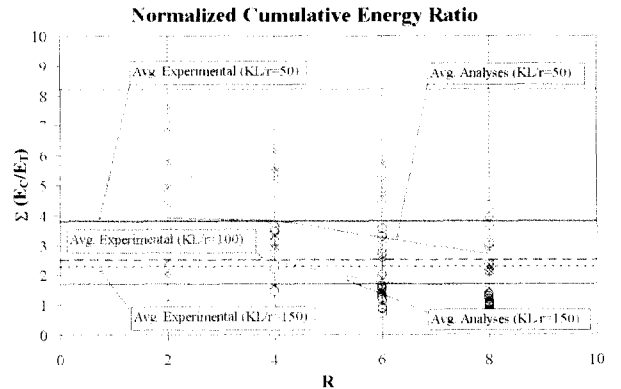


그림 8. 축적된 에너지 비 $\Sigma E_c/E_T$
(X : KL/r = 50, O : KL/r = 150)

3.2 세장비 (KL/r) 변화에 따른 영향

가새 부재의 세장비(KL/r) 변화에 따른 반응 수정 계수(R) 및 폭-두께 비(b/t)의 영향을 알아보기 위한 조사를 수행하기 위하여 가새 부재들을 다시 설계하였다. 부재 단면적(A) 및 부재 길이(L)는 변화시키지 않고 원하는 세장비(KL/r) 조건을 만족시키기 위하여 각형강관 부재의 폭, 높이 및 두께 등의 부재 단면 치수들을 변화시켜 상응하는 부재 회전반경(r)값을 찾았다. 그 밖의 설계과정은 2.2절의 과정과 동일하고 이 과정으로부터의 결과를 그림 9 및 10에 나타내었다.

여기에서 그림 9의 R값은 다음과 같이 계산되었다.

- (1) 세장비 KL/r=50 및 1, 2, 4, 6, 8의 R값으로 설계된 부재는 변화시키지 않고 그대로 둔다.
- (2) 부재 단면적(A) 및 부재 길이(L)는 변화시키지 않고 세장비를 50에서 각각 100 및 150으로 증가시키고 이 세장비 조건을 만족시키기 위하여 각형강관 부재의 폭, 높이 및 두께 등의 부재 단면 치수들을 변화시켜 상응하는 부재 회전반경(r)값을 찾는다.
- (3) 이 결과로부터의 단면 성능으로 가새 부재의 탄성 좌굴 부재력을 구한다.
- (4) 이 부재력으로 부터 상응하는 가새 골조의 밑면 전단력을 구한다.

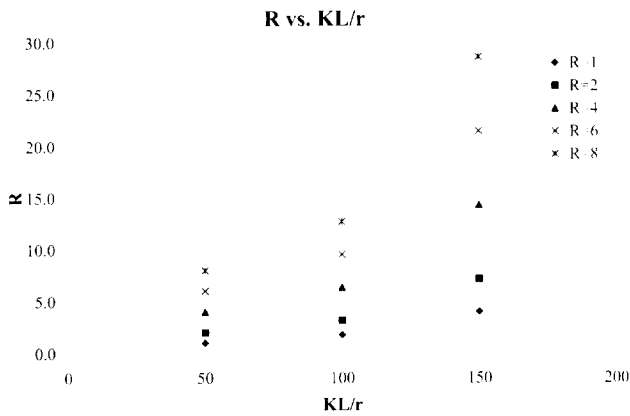


그림 9. 부재 세장비 (KL/r)가 R값에 미치는 영향

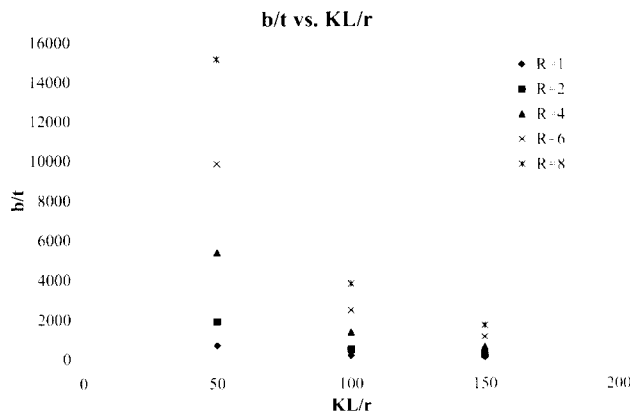


그림 10. 부재 세장비 (KL/r)가 폭-두께 비 (b/t)에 미치는 영향

- (5) 구조물의 모드 해석(Modal analysis)을 통하여 구조물의 주기(T_n)를 구한다.
- (6) 구조물의 주기(T_n)에 상응하는 밀면 전단력을 탄성 스펙트럼에서 찾는다.
- (7) (f)에서의 밀면 전단력을 (d)의 밀면 전단력으로 나누어 R값을 찾는다.

여기에서, X형 가새 형상 내의 각각의 가새 부재는 V/2가 적용됨을 가정하여 가새골조는 가새 부재력의 두 배에 상응하는 하중을 받게 되며, 여기서 인장 가새에 의한 초과강도는 고려되지 않았다. 위의 과정에서 R값은 탄성 스펙트럼의 구조물의 주기에 상응하는 밀면 전단력을 위에서 설명한 가새골조의 하중으로 나눈 값이 된다. 따라서 세장비 KL/r가 증가함에 따라 가새 부재력 및 이에 상응하는 가새 골조의 하중은 감소하고 결국 R값은 증가하게 된다.

그림 9과 10에서 보는 바와 같이, 세장비(KL/r)를 증가시키면, 폭-두께 비(b/t)는 감소하고 R값은 커짐을 알 수 있다. 이런 의미에서 R 값이 크다는 것은 큰 가새 부재의 세장비를 갖고 있는 가새골조가 큰 연성을 요구하며 또한 작은 폭-두께

비를 갖게 되므로 국부 좌굴에 의한 취성 파괴를 방지함을 의미한다. 3.1절에서 큰 R값을 갖는 가새 부재가 작은 축적 에너지 비의 결과를 보였는데, 본 절에서 R값은 세장비를 증가시키기에 따라 커지므로 결과적으로 세장비를 증가시킨다는 것은 축적 에너지 비를 감소시킴을 의미한다.

3.3 부재 길이(L) 변화에 따른 영향

본 절에서는 세장비의 부재 길이의 변화가 R값에 미치는 영향을 알아보기 위하여 3.2절과 약간 상이한 접근 방법을 사용하였다. 이 접근 방법은 각형강관 부재의 폭, 높이 및 두께 등의 부재 단면 치수들은 변화키지 않고 부재 길이만을 변화시켜 목적으로 하는 세장비(KL/r)를 갖는 부재를 설계하는 방법으로 그 외의 설계과정은 2.2절의 과정과 동일하고 이 과정으로부터의 결과를 그림 11에 나타내었다.

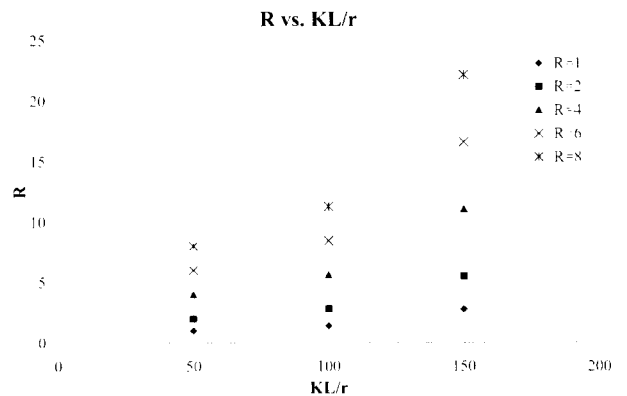


그림 11. 부재 길이 (L)이 R값에 미치는 영향

본 절에서의 접근 방법으로 가새 부재를 큰 세장비로 설계하게 되면 인장항복 강도($A \cdot F_y$)는 변화하지 않지만, 부재의 좌굴 강도는 작아지게 된다. 따라서 가새 부재의 세장비를 증가시키면, 3.2절의 접근 방법에서의 결과와 같이 작은 축적 에너지 비의 결과를 얻게 된다.

3.2 및 3.3절의 가새 부재 재설계과정 및 결과를 world wide web: <http://civil.eng.buffalo.edu/un/kangmin>에 올려놓았다.

3.4 고 찰

일반적으로 철골가새골조의 비탄성 이력 거동은 골조 내 가새 부재의 세장비(KL/r) 및 폭-두께 비(b/t)에 따라 달라진다. 큰 폭-두께 비를 갖는 가새 부재는 쉽게 국부 좌굴이

발생하는 경향이 있어 조기에 파괴에 이르게 된다. 최근의 연구(Archambault 등 1995)에 따르면 중간 이상의 세장비($KL/r \geq 70$)를 갖는 가새가 상당히 긴 비선형 이력을 보여 주어 파괴에 이르기까지 많은 사이클을 이력 함을 보여주고 이 사이클 수는 대략 세장비(KL/r)의 제곱에 비례함을 보여 준다.

3.1절부터 3.3절까지의 변수별 조사 결과 다음과 같은 사항들을 알 수 있었다.

- (1) 가새 부재를 큰 반응 수정 계수 R 을 적용하여 설계할 경우, 반복 하중 하에서의 축적된 에너지 소산 비($\Sigma E_c/E_T$)는 감소함을 알 수 있다. 이는 일반적으로 큰 R 값을 갖는 구조는 큰 연성을 갖게 되므로 큰 변형을 경험하며 많은 에너지를 소산할 것이라는 일반적인 기대와 상이한 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 계산하는 과정은 우선 압축 가새의 에너지 소산(E_c)을 그림 7에서와 같이 압축력-압축 변위의 이력곡선으로 둘러싸인 면적으로부터 구하고 이를 다시 E_c 계산 시 사용된 압축 변위에 상응하는 인장 에너지(E_T)에 의해 일반화시킨 후 이들을 부재 이력의 마지막까지 축적함으로써 계산하였다. 따라서 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)는 가새 부재의 변위만의 함수가 아니고 부재의 압축력 및 인장항복 강도도 함께 고려되어야 한다. 지진 하중의 이력 또한 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)에 영향을 준다. 그림 12 및 13은 동일한 세장비와 R 값을 갖는 동일한 가새 부재를 갖는 가새 골조를 여러 지진 하중으로 해석한 결과로부터의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 나타내는 그림이다. 두 그림에서 보이는 양상은 서로 비슷하지만, 몇몇 경우 서로 상이한 결과를 보이고 있다. 예를 들어 세장비 $KL/r=50$ 을 갖는 가새 부재 중 R 값을 2에서 4로 변화시킨 경우 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)의 값이 지진 기록 1의 해석 결과는 그 값이 30% 정도 감소하였지만 지진 기록 2의 해석 결과는 반대로 40%정도 증가함을 보였다. 지진 기록 1로부터의 결과를 보면 그림 12 및 13에서의 다른 경우들이 보여주는 성향과 일치하는 결과를 보이고 있다. 이 경우, $R=4$ 로 설계된 가새 부재가 $R=2$ 로 설계된 가새 부재보다 더 많은 변위 능력을 갖지만, 후자의 경우 ($R=2$)가 더 큰 부재력을 갖고 전자의 경우 ($R=4$) 부재가 큰 변위에 이르렀을 때 심한 부재력 저하를 보이게 되므로 결과적인 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)가 감소하는 경향을 보인다. 이에 반해, 일반적인 경향과 반대의 양상을 보인 경우(위 예의 조건과 동일한 부재

를 포함한 골조를 지진 기록 2로 해석했을 경우), 그림 3.8과 같이 $R=2$ 를 갖는 가새 부재는 $R=4$ 로 설계된 부재보다 큰 단면을 갖게 되므로 많은 탄성 이력을 보인 반면 $R=4$ 로 설계된 부재는 많은 비탄성 이력을 경험하게 되어 위에서 설명한 일반적인 경향과 반대의 양상을 보여준다.

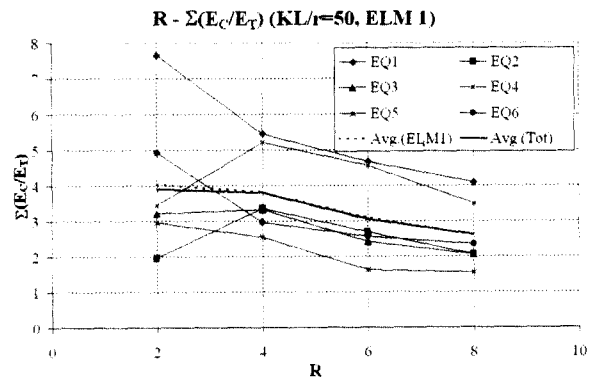


그림 12. X형 가새골조 내 가새 부재 1의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)

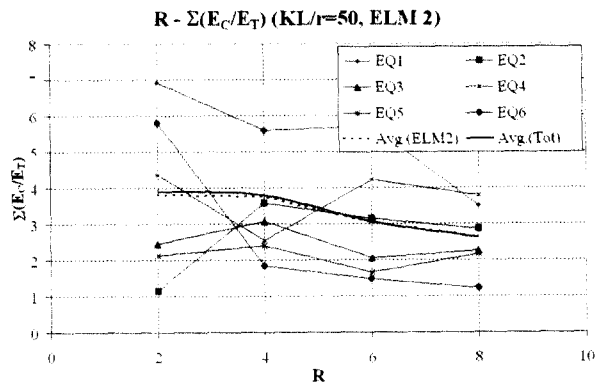


그림 13. X형 가새골조 내 가새 부재 2의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)

- (2) 세장비(KL/r)의 크기를 증가시켜 가새 부재를 설계하면 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)는 감소함을 알 수 있다. 이는 그림 3.9에서 개념적으로 보여주는 바와 같이 세장비에 따른 압축 에너지(E_c)에 대한 인장 에너지(E_T)의 비를 고려하면 쉽게 이해할 수 있다. 이 예에서 첫 사이클을 제외한 모든 사이클에 가새 부재의 탄성 좌굴 이후 부재력 감소를 적용하였다. 이 그림에서 일반화된 에너지(E_c/E_T)는 좌굴 이후 2번째와 그 이후의 사이클에서 $KL/r=50$ 인 경우 0.64, $KL/r=150$ 의 경우는 0.10 이고, n 사이클 후의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)는 각각의 경우 $0.64n$ 과 $0.10n$ 이다. 따라서 이들 두 경우가 똑같은 축적된 에너지

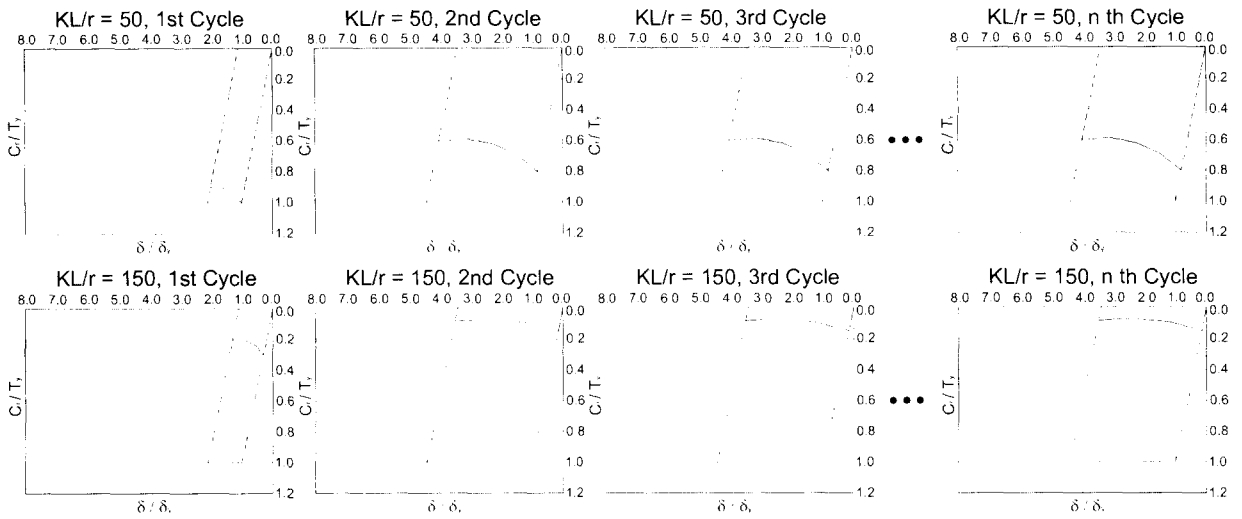


그림 14. 세장비 $KL/r=50$ 및 150 을 갖는 브레이스 부재의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)의 개념적 비교

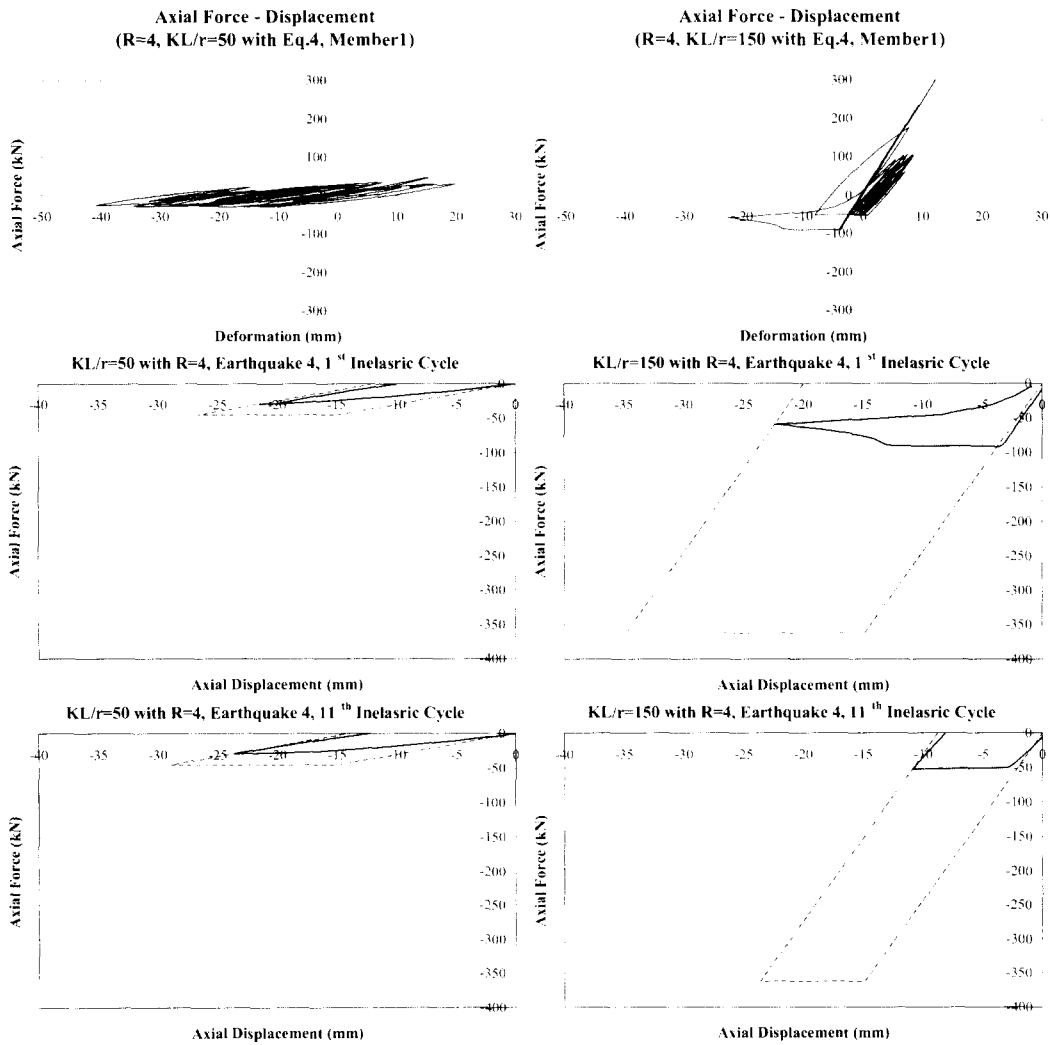


그림 15. 세장비 $KL/r=50$ 및 150 을 갖는 브레이스 부재의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)의 해석 결과로부터의 비교 ($R=4$, 지진기록4)

비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖게 되려면 $KL/r=150$ 인 부재가 $KL/r=50$ 인 부재보다 대략 6.4배 더 많은 비탄성 사이클을 경험하여야한다. 실제 지진기록을 사용한 해석 결과도 이와 비슷한 양상을 보였다. 그림 15의 예에서, $KL/r=150$ 으로 설계된 세장한 가새 부재가 $KL/r=50$ 으로 설계된 가새 부재보다 더 많은 비탄성 사이클을 경험하지만 $KL/r=50$ 으로 설계된 가새 부재가 더 큰 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖고있음을 알 수 있다. 이 예에서 좌굴 이후 첫 번째 사이클의 일반화된 에너지는 $KL/r=50$ 으로 설계된 가새가 0.39 그리고 $KL/r=150$ 으로 설계된 세장한 가새가 0.11 이고 11번째 사이클에서는 각각 0.47 과 0.14의 값을 갖는다. 또한 $KL/r=150$ 으로 설계된 세장한 가새가 $KL/r=50$ 으로 설계된 가새보다 1.76배의 비탄성 사이클을 경험하지만 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)는 전자 ($KL/r=150$)의 경우가 3.45로 후자의 경우($KL/r=50$) 5.22보다 더 작음을 알 수 있다.

- (3) 각형강관 가새 부재의 단면적과 부재 길이는 고정시키고 부재의 폭, 높이 및 두께 등의 부재 단면 치수들을 변화시켜 세장비 KL/r 을 증가시키면 결과적으로 큰 R값을 갖게 됨에 따라 큰 연성을 갖게 되지만 (a)에서 알아본 바와 같이 작은 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)의 결과를 낳는다.
- (4) 각형강관 가새 부재의 폭, 높이 및 두께 등의 부재 단면 치수들을 고정시키고 부재 길이를 변화시켜 세장비 KL/r 을 증가시켜도 (c)와 같은 결과를 보인다.

4. 결 론

철골가새골조 내의 가새 부재의 에너지 소산 요구 등의 이력 특성을 조사하기 위하여 단층 구조물의 비선형 동적 해석을 수행되었고 이들 해석 결과로부터의 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)의 계산 결과를 기존 실험으로부터 조사된 자료들로부터의 결과들과 비교하였다. 또한 가새 세장비(KL/r)가 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$) 및 R 값과 같은 동적 이력의 특성에 미치는 영향에 관하여서도 알아보았으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

철골가새골조 내의 가새 부재가 큰 반응 수정 계수(R)로 설계된 구조물이 우수한 연성 거동을 통하여 큰 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖게 되리라 예상과는 반대로 해석 결과는 큰 R값으로 설계된 가새 부재가 부재의 압축 좌굴 이후 심한 강도 저하를 보이고 설계 결과의 가새 부재력이 작기 때문에 오히려 작은 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖고 있음을 알 수

있었다. 특히, 반응 수정 계수(R) 4로 설계된 가새 부재들이 8로 설계된 부재들에 비해 평균 축적된 에너지 비가 세장비 50인 경우 30%, 그리고 세장비 150인 경우 35%정도 큰 것으로 나타났다.

해석 결과 및 Lee and Bruneau (2002)에 의해 수집된 실험 결과들을 근거로 한 실험 자료 모두 세장한 가새 부재가 대부분의 경우 더 큰 연성을 갖기는 하지만 작은 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖고 있음을 알 수 있었다. 특히 세장비, KL/r 50으로 설계된 가새 부재들이 세장비 150으로 설계된 부재들 보다 실험 자료들은 35% 그리고 해석 결과는 R값에 따라 35%~45% 정도 큰 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖고 있음을 알 수 있었다.

해석 결과 및 Lee and Bruneau (2002)에 의해 수집된 실험 결과들을 근거로 한 실험 자료 모두 세장한 가새 부재가 대부분의 경우 더 큰 연성을 갖기는 하지만 작은 축적된 에너지 비($\Sigma E_c/E_T$)를 갖고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 미국 뉴욕주립대학교(State University of New York at Buffalo) 내, 지진 연구센터(Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, MCEER)의 지원으로 수행되었으며, 자료 수집 및 연구 과정에 많은 도움을 준 동 대학교 Michel Bruneau 교수께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- AISC (1997), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Bruneau, Michel, Uang, Chia-Ming and Whittaker, Andrew (1998), Ductile Design of Steel Structures, McGraw-Hill, New York, NY.
- Gugerli, H. and Goel, S. C. (1982), Inelastic Cyclic Behavior of Steel Bracing Members, Report No. UMEE 82R1, January, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- Hassan, O. F. and Goel, S. C. (1991), Modeling of Bracing Members and Seismic Behavior of Concentrically Braced Steel Structures, Report No. UMCE 91-1, January, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, Ann

- Arbor, Michigan
- ICBO (1994), Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, California
- Ikeda, K. and Mahin, S. A. (1984), A Refined Physical Theory Model for Predicting the Seismic Behavior of Braced Frames, Report No. UCB/EERC-84/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Ikeda, K., Mahin, S. A. and Dermitzakis, S. N. (1984), Phenomenological Modeling of Steel Braces under Cyclic Loading, Report No. UCB/EERC-84/09, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Jain, A. K., Goel, S. C. and Hanson, R. D. (1977), Static and Dynamic Hysteresis Behavior of Steel Tubular Members with Welded Gusset Plates, Report No. UMEE 77R3, June, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- Lee, K. and Bruneau, M. (2002), Review of Energy Dissipation of Compression Members in Concentrically Braced Frames, Report No. MCEER-02-0005, December, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, Buffalo, NY.
- Lee, S. and Goel, S. C. (1987), Seismic Behavior of Hollow and Concrete-Filled Square Tubular Bracing Members, Report No. UMEE 87-11, December, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- Nonaka, Taijiro (1987), Formulation of Inelastic Bar Under Repeated Axial and Thermal Loadings, Journal of the Engineering Mechanics, vol. 113, No. 11, August, pp. 1647-1664, ASCE, Reston, Virginia.
- Prakash, V. and Powell, G. H. (1993), DRAIN-2DX, DRAIN-3DX and DRAIN-BUILDING, Base Program Design Documentation, Report No. UCB/SEMM-93/16, December, Structural Engineering Mechanics and Materials, University of California, Berkeley, California.
- Taddei, Pascal (1995), Implementation of the Refined Physical Theory Model of Braced Steel Frames in NONSPEC and DRAIN-2DX, August, Department of Civil Engineering, The University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada.

(접수일자 : 2003. 5. 7 / 심사일 2003. 5. 20 /
심사완료일 2003. 7. 9)