

전통 목조 프레임구조의 지진하중에 대한 거동 특성 Behavior of Traditional Wood Frames Under Earthquake Loading

홍성걸*
Hong, Sung-Gul

이필성***
Lee, Phil-Sung

ABSTRACT

This study presents the behavior of traditional wood structures of national heritage under earthquake loadings. A series of experimental program for four wood frames was performed to investigate characteristics of initial stiffness, behavior after ultimate loads, and hysteretic behavior. The frames consisted of columns with a lintel by special joint and a bare frame was infilled by a mud wall. A pushover test was aimed to estimate the range of ultimate rotation of connection as a pilot test for cyclic load tests. One of frames infilled by a mud wall showed a larger stiffness than those of bare frames due to a strut action in the diagonal direction. However, the post yielding stiffness of the infilled frame was not increased.

1. 서론

지진발생으로 예상되는 피해는 경제적인 손실은 물론 문화적인 손실을 포함할 수 있다. 예상되는 지진에 대한 사회간접시설, 건축물의 적절한 내진대책은 물론 문화재에 대한 내진 보호대책은 문화 유산의 전승의 의의 및 역사적인 가치가 크므로 매우 중요한 과제이다. 예상되는 지진에 대해 특히 전통 목구조는 구조물로서 지진피해에 노출되어 있는 대표적인 문화재로서 이에 과학적인 내진대책이 필요하며 이를 위해 기존 목구조의 체계적인 구조 공학적인 특성과약이 선결 과제이다.

목구조 문화재에 대한 외국의 내진대책으로 비교적 문화적 유산이 많은 유럽의 이탈리아에서는 석조와 조적조에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 일본의 경우 목구조 문화재에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 최근 한국 전통 목구조와 유사한 목조 프레임, 흙 벽체, 그리고 공포를 포함한 일련의 실험과 이를 토대로 해석적인 연구가 이루어졌다.

일본연구에 따르면 프레임이 심벽으로 채워져 있는 경우 수평재만이 설치된 프레임에 비해 약 15 배의 큰 강성 값을 갖고 최상층의 최대 변위능력 약 4배의 값을 갖는다. 실험의 결

* 서울대학교 조교수, 정회원

** 전 서울대 대학원생

과를 이용하여 Bilinear 모델과 Slip 모델을 중첩한 해석 모델을 제시하였다. 또한 하부 프레임의 제외한 공포의 양식에 따른 4가지 종류에 대한 진동대 실험을 실시하였다. 양식이 우리나라의 주심포 양식과 가장 유사한 시험체로 볼 수 있다. 실험결과 3개의 선형으로 이루어진 이력모형을 제시하였다. 수평력에 대한 저항에 큰 영향을 미칠 수 있는 수평재가 일본식 심벽에 존재하는데 비해 우리나라의 심벽은 구조적 역할을 할 수 있는 수평재가 존재하지 않는 것은 큰 차이점으로 볼 수 있다.

한편 국내의 경우 역사지진의 추정을 위해 민가의 목구조를 위해 역사적 기록을 추정하기 위해 반증자료로서 목구조의 지진거동을 연구하였다. 사개맞춤으로 구성된 초가삼간을 대상으로 정적하중과 수평반복하중을 주고 건물의 횡적 거동을 확인하였다. 가장 중요한 부분인 접합부의 설계에서 단지 하부의 프레임에 대해서만 고려하였다. 그러나 우리나라 전통적인 목조의 접합부의 형식을 보면 접합부 상부에 위치한 평방, 주두, 그리고 공포와 같은 상부 구조가 접합부의 거동에 영향을 줄 수 있다. 또한 시험체의 경우 접합부 외에도 인방이나 문설주 등의 프레임내의 가변적인 부재들이 포함되어 있다. 따라서 접합부 만의 고유한 특성을 파악하기 어렵다.

서양의 경우 목구조의 결구방식 및 시스템이 동양의 전통 목구조와 다르나 기본적인 히스테레틱 거동을 연구하여 지진하중에 대한 목구조의 요소 모형화에 기본자료를 제공하고 있다. 그러나 목조건축의 내진성능에 대한 연구가 이루어지고 있는 일본의 연구결과를 적용하는데 어느 정도의 한계가 있다. 우리나라의 목조건축양식은 일본과 함께 중국 건축문화권에 속해 있어서 전체적인 면에서는 유사한 면을 가지고 있으나, 재료의 결구 및 세부의 장에 있어서는 각기 다른 차이를 보이기 때문이다. 또한 국내에서 이루어진 목구조의 지진 특성 연구결과도 대상 목구조가 민가구조로서 문화재 목구조와 여러 가지 다른 면을 가지고 있다.

우리나라의 목조 문화재 건물은 구조적인 측면에서 가장 중요한 요소로서 평면의 구성 방식에 따른 분류를 할 수 있다. 가장 대표적인 두 가지 형태로 건물전체가 외부의 기둥에 의해서만 지지되는 외진형과 2열 이상의 내부 기둥이 상부 가구를 받치는 2고주형으로 구분할 수 있다. 두 가지의 유형 중 2고주형은 외진형의 형태에 내부의 기둥이 부가되어 있는 형태이므로 목조 건물에 대한 내진 성능을 알기 위해서는 외진형의 건물에 대한 연구가 선행되어야 한다.

외진형의 건물은 기둥과 창방이 하부구조를 이루고 그 위에 공포, 도리, 보, 지붕 등이 양식에 따라 다양하게 놓여진다. 따라서 목조 건물의 해석을 위해 우선적으로 건물의 하부 구조인 기둥과 창방으로 구성된 프레임의 구조적인 특성에 대한 실험적인 연구가 필요하다. 맞배지붕이나 팔작지붕 등의 다양한 형태의 지붕이 존재하나 지붕의 형태는 지붕구조의 하중을 산정하는 요소로서 파악될 뿐 수평력에 대한 구조적인 역할의 차이점을 거의 나타내지 않는다. 공포의 양식은 목조 건물 분류의 중요한 근거로서 고려되는 자료인데 이는 역시 구조적인 측면에서도 지붕의 구조체와 하부의 프레임을 연결시켜주는 부재로서 양식에 따른 상당한 차이점을 보일 것으로 예상된다. 그러나 본 논문에서는 프레임에 대한 연구를 중심으로 한다.

본 연구에서는 실험을 통해 얻은 수평하중에 대한 우리나라의 목조 프레임의 이력곡선을 근거로 구조해석이 가능한 역학적 계수를 조정 제시하고 이용하여 가상의 지진하중에 대한 동적인 특성을 조사한다.

2. 목조프레임의 이력모델

목조 프레임의 내진성능의 평가를 위해 3가지의 시험체에 실험을 수행하였다.¹⁾ 가장 기본적인 형태로서 기둥과 창방만으로 구성된 CBD 시험체, CBD시험체의 상부에 평방이 추가된 CBBDS시험체, CBD시험체의 내부에 심벽이 추가된 CBWDS시험체에 대한 수평반복하중실험을 수행하였다. 위의 실험 결과를 바탕으로 3가지의 구조형식에 대한 이력곡선을 Drain-2DX 프로그램에서 제시한 모형을 이용하여 적절한 히스테리시스 모델을 선정하였다.

하중-변위 이력곡선의 형태적인 특성에 따라 프로그램내의 bi-linear 트러스 부재(element 1)와 인장/압축 연결 부재(element 9)를 이용하면 실험에서 나타난 하중-변위곡선에 근접한 이력모델을 구성할 수 있다. bi-linear 트러스 부재는 인장과 압축에 대하여 항복 후 일정한 강성을 유지하고 압축에 의한 좌굴은 일어나지 않는 부재로서 초기의 변형과 하중감소의 영역에서 실제의 곡선의 강성값을 이용하여 구성된다. 인장/압축 연결부재는 그림 1 과 같은 형태의 특성을 가지면서 강성이 다시 증가하는 부분과 핀칭 효과의 증가에 해당하는 영역에서의 곡선을 구성한다.

기둥-창방으로 구성된 프레임(CBD): 시험체 CBD의 반복하중에 대한 이력곡선과 해석 모델을 이용한 이력곡선이 그림 2와 같이 나타났다. 하중-변위 이력곡선은 항복변형을 경험한 후 강성의 저하가 발생하고 핀칭이 증가하는 형태를 나타낸다. 또한 20mm이상의 변위에서는 일정한 강성을 갖는 형태를 나타내는데 이는 주먹장의 미끌림에 의해 발생하는 형태이다. 해석모델은 탄소성을 갖는 트러스 부재와 초기 간극을 존재하고 bi-linear한 형태를 가지는 연결부재를 병렬로 연결하여 구성하였다.

기둥-창방-평방으로 구성된 프레임(CBBDS): 시험체 CBBDS의 반복하중에 대한 이력곡선과 해석 모델을 이용한 이력곡선은 그림 3과 같다. 하중-변위 곡선에서 최고점을 연결한 곡선은 초기 강성이 크고 강성의 감소 비율은 상대적으로 큰 완만한 비선형의 형태를 나타낸다. 또한 하중감소에 대한 강성은 시험체 CBD와는 달리 완만한 곡선을 나타내기 때문에 핀칭 효과가 약해진다. 이는 시험체 CBD의 경우는 접합부의 변형이 증가되면서 하중을 받지 못하고 접합부가 회전하면서 좌우의 변위의 차가 커지게 되는데, 평방이 존재할 때는 기둥과의 연결재가 축이 대신 하중을 부담하게 되어 강성 감소의 비율이 작아지게 된다 해석모델은 항복 후에도 강성저하가 적은 bi-linear한 형태의 트러스 부재와 초기 간극이 존재하지 않고 극한점이 존재하는 tri-linear한 형태를 가지는 연결부재를 병렬로 연결하여 구성할 수 있다.

기둥-창방-심벽으로 구성된 프레임(CBWD): 시험체 CBWD의 반복하중에 대한 이력곡선과 해석 모델을 이용한 이력곡선이 그림 4와 같이 나타났다. 하중-변위 곡선에서 각 최고점을

연결한 곡선은 시험체 CBD의 형태와는 달리 특정한 항복구간이 존재하지 않고 서서히 강성이 감소하는 전체적으로 비선형적인 곡선을 형성한다. 또한 하중감소에 대한 강성은 시험체 CBD와 비슷하지만 반대방향하중에 대해서는 시험체 CBD와 달리 약간의 강성을 갖는다. 그러나 각 사이클 최대변위 경험 후에는 핀칭 효과가 시험체 CBD에 비해 증가하게 된다. 해석모델은 항복 후에 큰 강성저하를 나타내는 bi-linear한 형태의 트러스 부재와 초기 간극을 존재하지 않고 tri-linear한 형태를 가지는 연결부재를 병렬로 연결하여 구성하였다.

표1. 각 해석모델의 특성값

	k_e	k_p	k_1	k_2	k_3	k_4	f_y	u_0	u_1	u_2
CBD	0.015	0	0.042	0.0198	0.0198	0.0042	0.015	0	0.042	0.0198
CBBD	0.022	0.015	0.02	0.002	0.001	0.44	0.022	0.015	0.02	0.002
CBWD	0.07	0.014	0.07	0.024	0.0005	0.03	0.07	0.014	0.07	0.024

3. 목조프레임의 구조해석

3가지 시험체에 대해 앞에서 이력곡선의 형태를 기초로 하여 이력모델을 구성하였다. 그러나 이를 외부 지반가속도에 대한 동적인 해석을 하기에 앞서 위의 모델에 대한 타당성을 검증할 필요가 있다. 이력모델을 검토하기 위한 방법으로 각 모델에서 발생하는 소산에너지와 실험에서 얻은 소산에너지의 값을 비교하여 모델의 적용가능성을 검토하고자 한다. 해석모델에 대해 실험에서와 같은 입력변위를 대입하여 그에 대한 소산에너지를 구하였다.

시험체CBD의 실험 결과와 해석모델에 의한 소산 에너지의 비교에서 횡변위 10 mm에서 실험과 해석을 비교하면 약 10 % 가량 크게 나타났고 변위가 매우 큰 부분에서는 약 5 % 가량 작게 나타났다. 시험체CBBD의 실험 결과와 해석모델에 의한 에너지 비교에서는 초기 변위에서 비율상으로 매우 큰 차이를 보이는 데 그 에너지의 양이 매우 작기 때문에 전체적인 거동에는 큰 영향을 주지 않을 것이고, 20~80 mm의 변위에서는 실험 해석 결과가 약 10 % 가량 크게 나타났고 변위가 매우 큰 부분에서는 거의 비슷한 결과를 나타냈다. 3개의 모델 중에서 가장 근사한 형태를 나타내었으나 첫번째 하중 경험시의 소산에너지가 그 하중경험 이후의 소산에너지에 비해 다소 큰 경향을 나타내었다. 위의 결과로부터 프레임의 실제 모델로서 이용한 결과가 실제의 시험체의 거동과 크게 상이하지 않을 것임을 알 수 있다.

영산전의 정면과 배면의 골조프레임을 대상으로 정하여 시험CBBD와 CBWD를 설계하였다. 위에서 제시한 이력 모델을 이용하여 영산전에 대한 해석한다. 지진과의 방향은 건물의 길이 방향으로 하고 정면과 배면의 강성의 차이에 의한 비틀림은 없다고 가정한다. 또한 지진과의 방향에 직교하게 서있는 건물 양 옆의 프레임은 건물전체의 강성에 영향을 주지 않

고 건물 내부의 지붕구조는 횡력에 저항하지 못하고 단지 정면과 배면을 연결시키는 다이아프램의 역할을 하는 것으로 가정한다. 건물의 하중은 실제의 건물로부터 계산한 값을 사용하고 전체의 하중이 8개의 기둥에 고르게 수직으로 분포하는 것으로 가정한다. 이러한 원칙에 의해 영산전의 모델은 그림 5와 같이 구성하였다. 앞에서 제시했던 개별적인 프레임에 대한 모델은 단순하게 수평력에 대해 트러스가 축력에 저항하는 형태였으나 건물전체의 모델에서는 개별적인 모델들이 접합부에서 모멘트에 저항하는 형태로 모형화하고 그에 따라 각 부재의 강성값을 환산하였다. 그림 6과 같은 기둥의 길이가 L 인 1경간 프레임에 상부에 수평력 P 가 작용하는 경우를 가정한다

$$k = k_t \left(\frac{L}{h} \right)^2$$

위의 식으로부터 얻은 값을 그림 5의 모델에 대입하여 지진가속도를 이용하여 시간-이력 곡선을 구하였다. 입력 지진파는 0.02초 간격으로 3가지의 실제의 지진가속도를 0.11g의 크기로 감소시켜 이용하였다. 각 모델에 부가되는 질량은 실제의 계산을 바탕으로 하여 건물 전체 하중의 1/8만큼으로 산정하였다. 전면과 배면의 등가점성감쇠비를 고려하여 감쇠비가 0.2인 경우에 대하여 응답을 구하였다.

각 지진파에 대한 시간 이력에서 최대 변위의 경우 $P-\Delta$ 효과에 의해 증가되는 모멘트를 산술적인 합에 의해 최대변위를 구해보면 가장 변위가 큰 Kobe 지진파의 경우 고려하지 않은 상태보다 약 11.3mm의 변위가 증가하게 된다. 따라서 $P-\Delta$ 효과를 고려한 최대 변위는 Kobe 지진파의 경우 66.1mm가 된다.

시험체의 경우 기둥의 반지름이 180mm의 크기인 것을 고려하면 반지름의 1/2보다 작은 66.1mm의 변위는 건물의 안정성에 영향을 주지 않을 것으로 예상된다.

4. 결론

위의 해석을 통해서 본 결과 우리나라에서 일반적으로 적용하는 수중의 지진가속도에 대해서는 구조적으로 크게 문제가 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 문화재의 특성상 단지 구조적인 측면뿐 아니라 조형적인 면을 고려해야 하므로 결과로 나온 66.1mm의 변위가 충분히 안전하다는 결론을 내릴 수는 없다.

초기강성에 대한 제안식의 경우 그 값이 실험의 결과와 약 25% 가량의 차이를 나타내는데 이는 전통 목조 접합부의 형식상 제안식에서 가정한 완전한 결합의 형태가 불가능하고 또한 작업의 숙련도 등에 의해 차이가 발생할 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 강성값의 전체식에 적절한 계수를 추가하여 이러한 오차에서 오는 차이를 보정할 수 있다. 본 실험을 통해 얻은 결과가 모든 전통 목구조에 적용하기에 충분하지 않고 각 경우가 독립적인 성격을 가지고 있기 때문에 축적된 실험자료로부터 보정 계수값의 범위를 결정할 수 있을 것이다

지금까지의 분석은 1경간의 프레임에 기본적인 요소들을 가지고 있는 경우에 대한 실험과

해석을 하였다. 이러한 프레임들이 통합된 전면이나 배면의 여러 경간을 가진 프레임과 기본적인 요소들이 조합되어 있는 프레임에 대한 해석이 추가되고, 건물 전체의 거동에 중요한 역할을 할 수 있는 공포재의 특성을 포함한다면 보다 정확한 목조 건물의 수평하중에 대한 특성을 이해하는데 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구과제는 자연재해방재기술개발사업의 일환인 차세대 내진설계 개념과 지진응답 제어 기법연구(1997-2000)의 연구비로 수행되었음을 밝히며 실험연구를 위한 대우기술연구소의 관계자 여러분의 협조에 감사드립니다.

참고문헌

1. 홍성걸, 이필성(1999), "전통 문화재 목조 프레임의 횡하중에 대한 거동 및 이력특성," 한국 지진공학회 학술발표회 논문집 제3권 2호, pp.396-403.
2. 장기인(1998), "木造," 보성각, p.380.
3. Seo, J., Choi, I. and Lee, J.(1999),"Static and Cyclic Behavior of Wooden Frames with Tendon Joints under Lateral Load," J. Struct. Engrg, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp.344-349
4. Clough, R. W. and Penzien J.(1993), "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, Inc., p.730.
5. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철(1997), "수평 교번하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력특성 평가," 한국지진공학회 논문집 제1권 3호, pp.21-27.
6. Fujita, K., Sakamoto I., Ohashi, Y., and Kimura, M. (2000), "Static and Dynamic Loading Tests of Bracket Complexes Used in Traditional Timber Structures in Japan", 12 WCEE, Vol 10, paper No. 0851

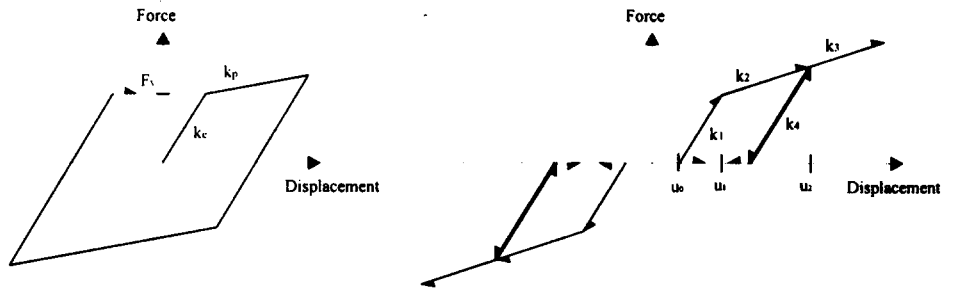


그림1. Drain-2DX 모델의 부재특성

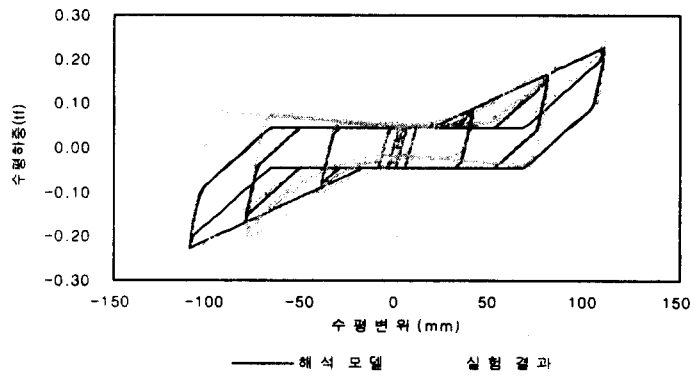


그림2. 시험체 CBD 비교이력거동

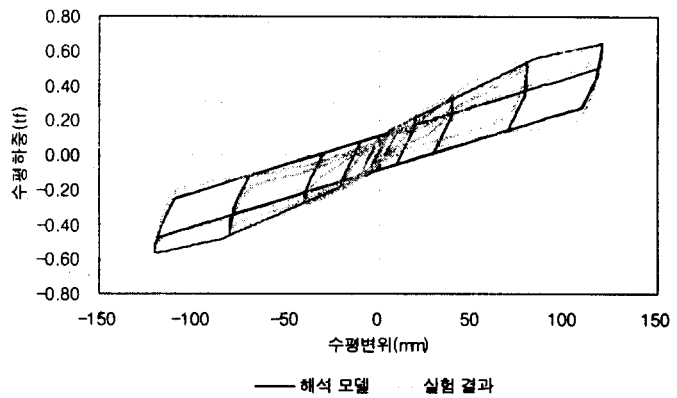


그림3. 시험체 CBBDD의 이력거동 비교

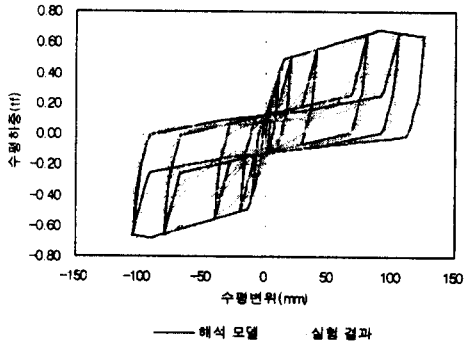


그림4. 시험체 CBWD의 이력거동 비교

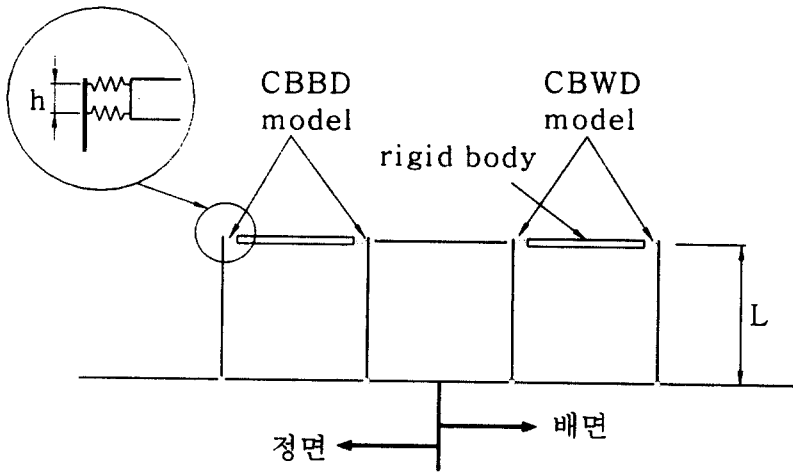


그림5. 영산전의 해석 모델

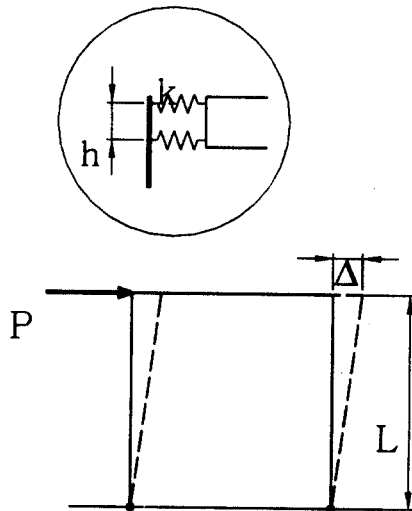


그림6. 전체모델과 부분모델 사이의
회전강성과 수평강성의 관계

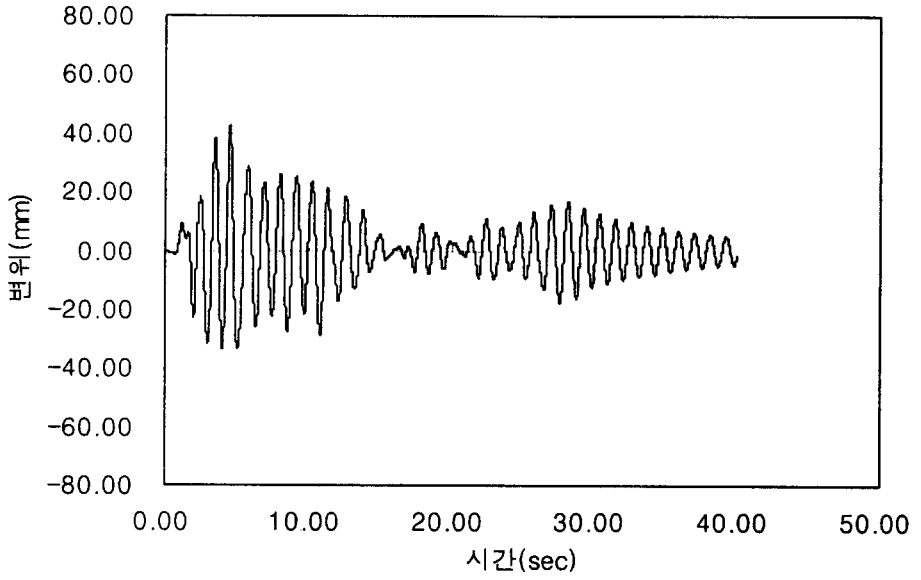


그림7. 영산전 모델의 시간 이력 곡선 (El Centro)

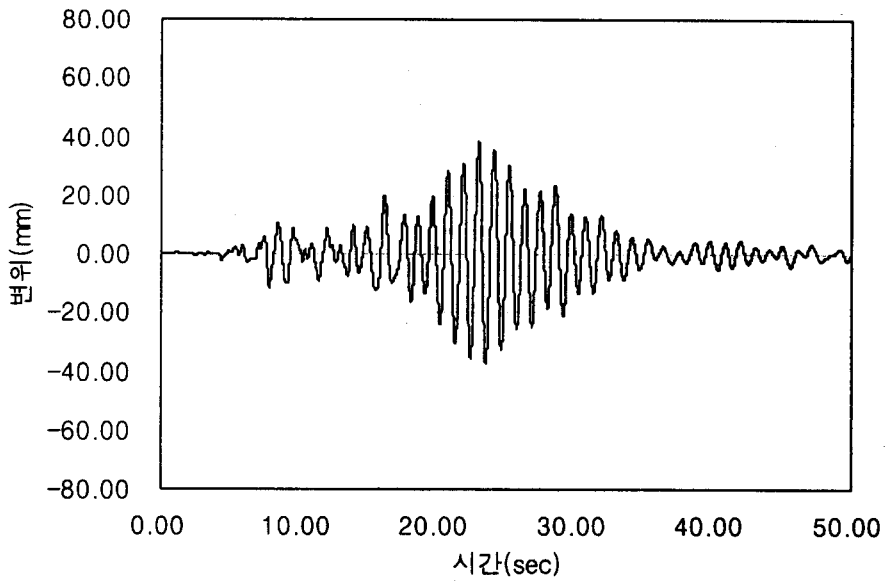


그림8 영산전 모델의 시간 이력 곡선 (Northridge)

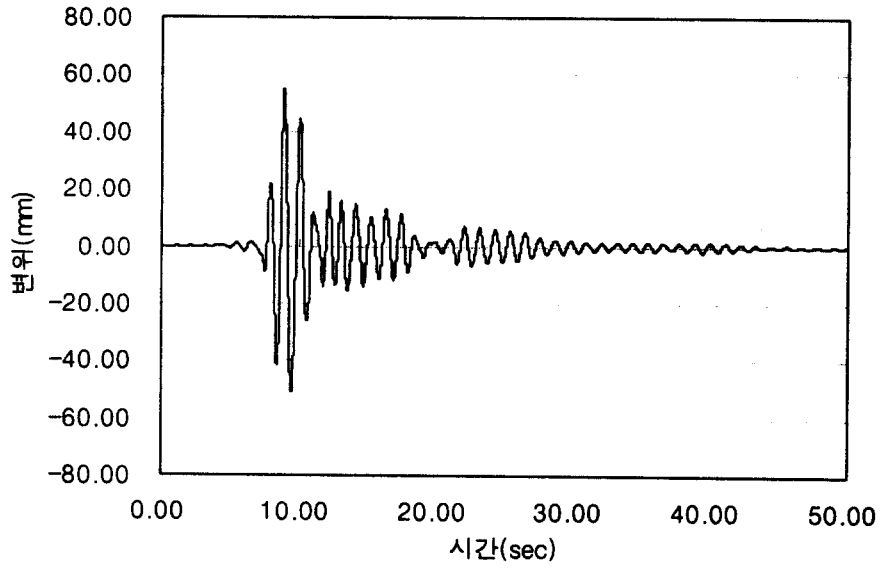


그림9. 영산전 모델의 시간 이력 곡선 (Kobe)