

4m×4m 진동대를 이용한 구조모델의 동적실험

Dynamic Test of Structural Models Using 4m×4m Shaking Table

이 한 선*
Lee, Han Seon

우 성 우**
Woo, Sung Woo

김 병 현***
Kim, Byung Hyun

국문요약

이 연구의 목적은 진동대를 사용한 지진모의 기술의 현황을 살펴보고 그의 신뢰성을 검토하는 것이다. 1자유도 및 3자유도 알루미늄 전단구조 모델이 사용되었으며, 4m×4m 6자유도 진동대가 1940 El centro 지진 가속도 기록(NS요소)를 재현하기 위해 수평 1방향으로 흔들어졌다. 진동대의 실제 가속도 이력과 목표 가속도 이력을 비교할 때, 전반적인 이력은 매우 흡사했으나 실제 진동의 저 주파수 영역은 목표치보다 후리에 변환 강도에서 낮은 값을 대체로 나타내고 있었다. 자유진동 및 백색파 실험은 고유주파수에 대해서는 거의 일치하는 값을 나타내고 있으나 감쇠계수에 대해서는 자유진동실험의 경우 1.4%, 백색파 실험의 경우 14.8%를 나타내어 큰 차이를 보여주고 있다. 층 전단력 대 층간변위의 이력곡선으로부터 전체적으로 선형탄성 거동을 나타내고 있으나 이 이력곡선의 모습이 층 강성을 한축으로 하는 타원형을 나타내어 점성감쇠의 영향을 암시하고 있다.

주요어 : 진동대, 지진모의

ABSTRACT

The objective of this study is to review the current state of earthquake simulation techniques using the shaking table and check the reliability. One degree-of-freedom(d.o.f.) and three d.o.f. aluminium shear models were used and 4m×4m 6 d.o.f. shaking table was excited in one horizontal direction to simulate 1940 El centro earthquake accelerogram (NS component). When the actual acceleration history of shaking table is compared to the desired one, it can be found that the overall histories are very similar, but that the lower frequency range (0~2 Hz) of the actual excitation has generally lower amplitude than that of the desired in Fourier transform amplitude. Free vibration and white noise tests have shown almost the same values for natural frequencies, but shown quite different values for damping ratios, that is, 1.37% in case of free vibration test vs 14.76 % in case of white noise test. The time histories of story shear versus story drift show the globally linear elastic behaviors. But the elliptical shape of the histories with one of the axis being the stiffness of the story implies the effect of viscous damping.

Key words : shaking table, earthquake simulation

1. 서 론

근래에 우리나라에서도 사람이 감지할 수 있는 지진이 거의 매년 20회 이상 발생하여 왔고, 특히 1996

년 12월 13일 영월에서 발생한 지진은 건축물에 상당한 손상을 줄 만큼 큰 지진으로서 우리나라도 지진에 대하여 안전지대가 아님을 확실히 보여주고 있다. 특히 1995년 1월 인근 일본 고베에서 발생한 지진은 약 5000명 이상의 사망자와 천문학적인 재산피해를 초래한 사실을 볼 때, 우리나라에서도 이러한 대형지진에 대해서 유비무환의 자세로 대비책을 강구하는 것이

* 정회원 · 고려대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

** 정회원 · 영남대학교 건축공학과 석사과정

*** 정회원 · 한국기계연구원 구조시스템 연구부, 공학박사

바람직하다고 여겨진다.

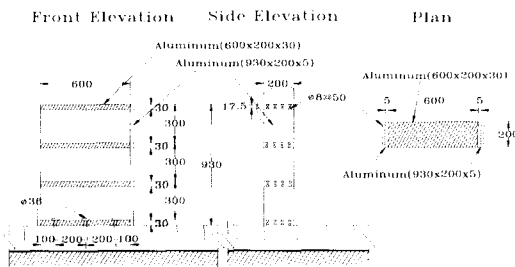
구조물의 지진에 대한 안전성을 증대시키기 위한 기술은 내진공학이라는 분야에서 세계적으로 많은 발전을 이룩하여 왔다. 특히 구조동역학 및 비선형 해석 이론에 의한 예측과 더불어, 실제 구조물에 나타나는 거동을 실험을 통해 확인하여 상호 보완함으로써, 실제 구조물의 내진설계 또는 성능평가에 이 실험과 이론 결과를 활용하여 왔다.

내진공학에 있어서 실험은 크게 부재요소 거동실험과 구조물 전체의 거동실험으로 분류할 수 있으며, 이 중에서 구조물 전체의 지진에 대한 반응실험은 주로 진동대를 이용한 모의지진실험에 의해 수행되고 있다. 부재요소 거동실험은 대부분 정적실험법에 따르므로 다른 분야의 실험법과 동일하여 국내에서도 용이하게 수행되고 있다. 다만 외국의 경우 이 진동대 실험이 오래전부터 활용되어 많은 연구결과를 얻었으나, 국내에서는 아직도 진동대 실험분야는 초보적인 단계에 머물러 있다고 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 진동대를 이용한 지진모의 실험기법을 실제로 간단한 구조모델과 4m×4m 진동대를 이용하여 연구하였다. 즉, 본 연구의 목적은 사용된 진동대의 지진과 모의 성능을 우선 검토하고 고유주파수 및 감쇠계수와 같은 동적특성치 도출법을 비교 연구하였으며, 얻어진 데이터를 통한 동적거동 분석을 시도하여 보았다.

2. 실험체의 설계 및 제작

본 연구를 위하여 실험체는 1 자유도(Degree of freedom : D.o.f.) 실험체와 3 자유도 실험체를 알루미늄으로 각각 1 세트씩 제작하였으며, 그림 1에 그 상세를 나타내었다. 실험체의 총 중량은 1 자유도와 3 자유도 실험체 각각 13 kg과 34.2 kg이며, 여기에서는 3 자유도 실험체를 중심으로 설명하기로 한다.



3 D.o.f model

그림 1 Details of models (unit : mm)

3. 실험

3.1 실험개요

실험은 실험체의 동적특성을 알아보기 위한 자유진동실험(Free vibration test)과 백색과실험(White noise test) 등의 동적특성규명실험과 지진모의실험(Earthquake simulation test)으로 나누어 진행하였다. 자유진동실험은 지진모의실험 전과 후에 실시하여 지진에 의한 구조물의 동적특성의 변화를 살펴보았으며, 지진모의실험은 입력지진파의 최고가속도의 크기를 0.12g, 0.25g, 0.319g등으로 조정하여 실시하였다. 동적특성규명실험과 지진모의실험에 대한 실험일정은 표 1에 주어져 있다.

표 1 Schedule of dynamic tests

Sequence	Test Type	Peak Ground Acceleration (PGA)
1	Free vibration test	
2	White noise test	0.02g, 0.05g
3	1940 El centro NS component	0.12g
4	1940 El centro NS component	0.25g
5	1940 El centro NS component	0.319g
6	Free vibration test	
7	White noise test	0.02g

3.2 실험장치 및 기기

3.2.1 진동대 및 데이터 취득 장비

본 실험에서 사용된 진동대는 미국 MTS System Corporation으로 부터 도입하여 대덕연구단지에 위치한 한국기계연구원에 설치된 종합적인 구조적 진동실험 장비이다. 진동대의 크기는 4m×4m로 실험체에 최대 30톤의 하중과 1.5g까지의 가속도를 가할 수 있도록 되어 있으며, 가진과 동시에 56개의 진동 신호를 계측, 기록할 수 있다. 8개의 가력기를 사용하여 6자유도의 운동을 구현하며, 조화파(Sinusoidal wave)형, 랜덤파형 및 각종 지진파, 실제 계측된 지진파 등 임의의 파형을 재생 구현할 수 있다.

지진 전용 Program인 STEX(Seismic Test Execution Software) 로 입력신호를 생성하며 이 신호는 Analog Control System을 통하여 진동대를 구동하게 된다.

실험체에 부착된 각종 센서들의 시그널들은 채널을

통하여 Anti-aliasing Filter, A/D Converter를 거쳐 컴퓨터에 디지털 데이터로 저장하게 된다. 들어온 신호들은 STEX를 이용하여 원하는 데이터로 처리하게 된다.

3.2.2 계측기기

가속도 측정을 위해 모델의 각 층에는 가속도 계기가 입력 진동에 평행방향으로 각 층에 1개씩 3개(혹은 1개)가 설치되어 수평가속도를 측정하였으며, 입력 가속도이력의 정확한 재현을 검증하기 위해 진동대에도 1개를 부착시켰다(그림 2(1,2)참조). 가속도계 응답은 지진반응에서 관성력(각 층 위치에서의 수평가속도 × 질량)계산에 이용되었으며 2번 적분하여 변위를 구함으로써 변위측정기에서 구한 횡변위와 비교하는 데도 이용된다. 또한 이 값들로부터 밀면 전단력계산 등 다양한 응답해석이 가능하다.

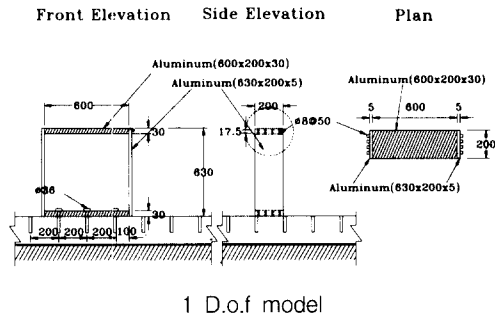


그림 2 Instrumentation identification and locations (unit : mm)

진동대 바깥의 외곽 콘크리트 베이스에 진동대의 변위이력을 기록하기 위해 변위측정기가 고정되었다. 진동대에 대한 구조물의 상대 횡변위 측정을 위해 각 진방향(Longitudinal direction)으로 진동대 위에 강성이 매우 큰 기준 프레임이 모델에 근접하여 고정되었다. 이 기준 프레임에 각 층별로 T자형 팔을 달아 팔의 끝단에 변위측정기 몸통을 강철밴드로 죄어 수평이 되도록 고정하였다(그림 2 참조). 각 변위측정기는 스트레인 게이지 타입으로 실험시작 전에 내부스프링에 의해 중립위치에 놓여진다. 이 때 실험체가 빨리 거동할 때, 이 거동을 변위측정기가 충분히 정확하게 측정할 수 있는지의 여부를 또한 관찰하여 보았다.

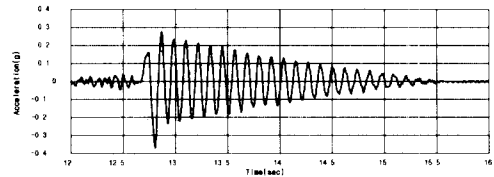
3.3 동적특성규명실험

3.3.1 자유진동실험

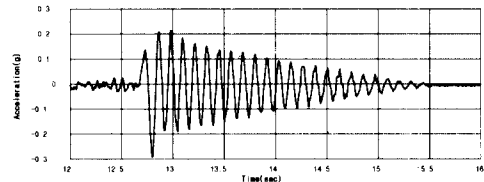
이 실험방법은 실험체를 인위적으로 3~5mm정도 잡아당긴 후 갑자기 놓음으로써, 초기변위에 의한 자유진동을 유발시키는 실험이다. 그림 3에서는 3 D.o.f.모델의 지진입력실험 전의 층별 가속도 응답을 나타내었고 그림 4에서는 이 층별 가속도 응답의 후리에 변환(Fourier transform)을 나타내었다. 그림 4로부터 주로 1차모드에 의해서 모델 거동이 지배되는 것을 볼 수 있으며 모델의 고유주파수 f_i 는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$f_i = \begin{bmatrix} 8.59 \\ 23.24 \\ 35.16 \end{bmatrix} \text{ Hz}$$

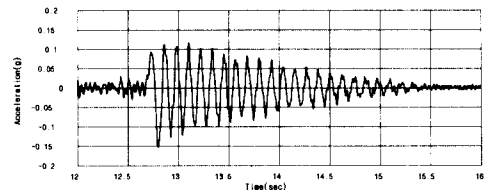
또한, 그림 3(a)에서 보여지는 자유진동 가속도 응답 시간이력으로부터 대수감소법(Logarithmic decrement method)를 사용함으로써 1차모드의 감쇠비는 1.37%로 나타났다.



(a) Roof

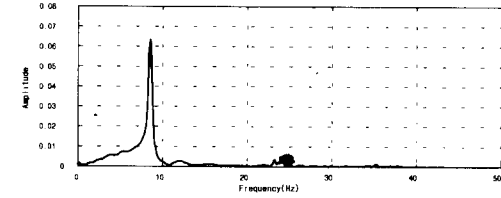


(b) Third floor

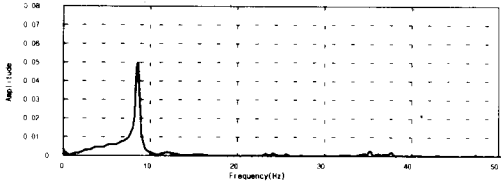


(c) Second floor

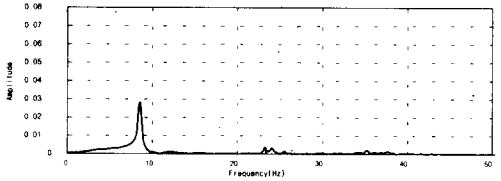
그림 3 Story level acceleration response



(a) Roof

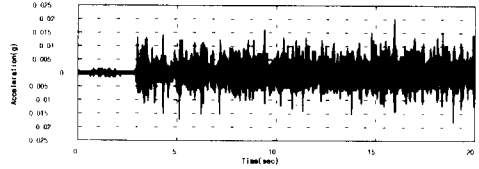


(b) Third floor

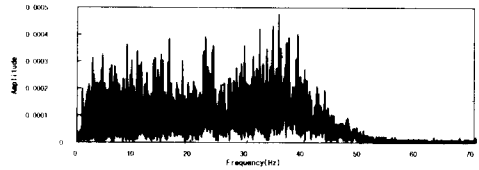


(c) Second floor

그림 4 Fourier Transform



(a) Acceleration time history of shaking table white noise



(b) Fourier Transform of shaking table white noise

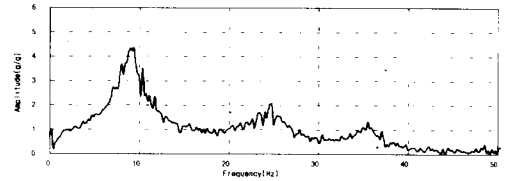
그림 5 Shaking table white noise

3.3.2 백색파실험

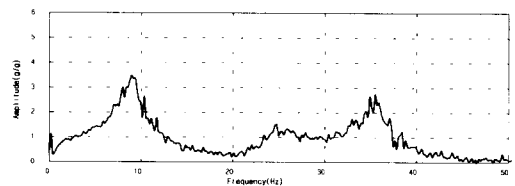
지진모의실험 이전에 수행한 백색파(White noise) 실험은 그림 5(a)와 같은 가속도를 진동대에 가력한 것으로 최대 밀면가속도는 약 0.02g이다. 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 0~45Hz 까지의 파가 거의 같은 세기(Amplitude)를 가진 것을 알 수 있다. 그림 6은 그림 5의 입력 밀면운동에 의한 3 D.o.f.모델의 층별 가속도 응답의 이전함수(Transfer Function)를 나타낸 것이며, 이 이전함수를 매끄럽게(smoothing) 나타낸 결과가 그림 7에 나타나 있다. 그림 7로부터 다시 이 구조모델의 고유주파수 f_i 는 다음과 같이 나타나고 있다.

$$f_i = \begin{bmatrix} 8.84 \\ 24.57 \\ 35.43 \end{bmatrix} \text{ Hz}$$

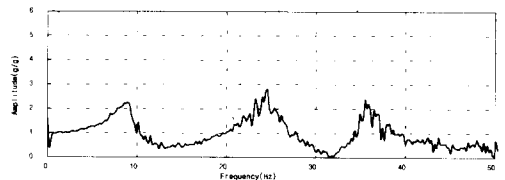
이 그림에 half-power(bandwidth) method를 이용하여 감쇠계수를 구하여보면 1차, 2차 및 3차 모두에 대하여 14.76%, 7.2%, 3.6%로 나타났다.



(a) Roof

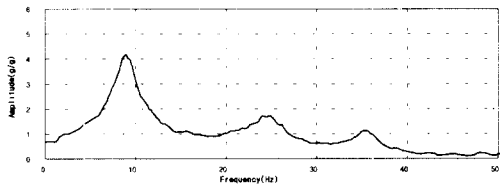


(b) Third floor

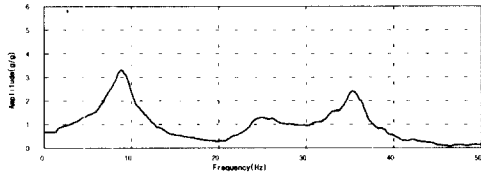


(c) Second floor

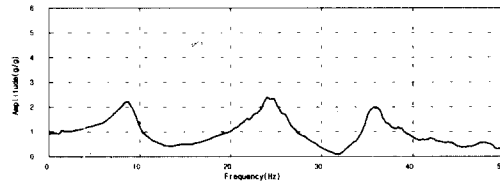
그림 6 Transfer functions



(a) Roof



(b) Third floor



(c) Second floor

그림 7 Smoothed transfer functions

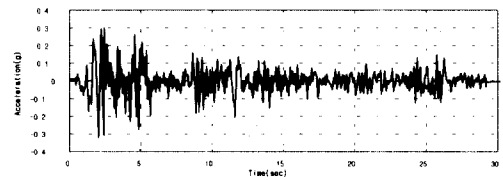
3.4 지진모의실험

지진모의실험은 El-Centro 지진의 NS요소를 최대지반 가속도(Peak Ground Acceleration) 0.12g, 0.25g, 0.319g로 조정하여 실시하였다. 그림 8에서는 의도된 가속도 이력인 El-Centro 지진(PGA 0.319g)의 NS요소와 진동대에서 실제로 출력된 가속도 운동을 그림 8 (a), (b), (c)에서 비교하여 본 결과 대체적인 경향은 일치하고 있으나, 정확히 일치하지는 않고 있음을 알 수 있다. 또한, 입력과 출력 진동대 가속도의 후리에 변환(Fourier transform) 결과를 그림 8(d)에서 비교한 결과 0~2Hz 사이의 주파수 성분에서 실제 출력 진동대 가속도 세기가 의도한 입력 가속도보다 약하게 나타나고 있음을 발견할 수 있다. 그림 9는 PGA 0.319g에 대한 층별 변위 응답을 보여주고 있으며, 여기서 대체로 1차모드에 의해 지배되는 거동특성을 발견할 수 있다. 그림 10에서는 각 층별 가속도에 층별 질량을 곱함으로써 얻어진 각 층별 전단력과 층간변위와의 관계를 나타내었고, 각 층에 대한 최대응답은 표 2에 요약하였다. 층전단력 - 층간변위 이력곡선에서 강성을 나타내는 축을 중심으로 타원형을 나타내고 있어 점성감쇠(viscous damping)의 영향이 크게 작용하

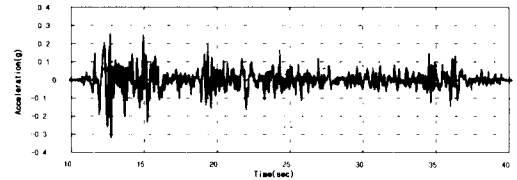
고 있음을 발견하였다.

표 2 Maximum response for El-Centro NS base motion (PGA 0.319g)

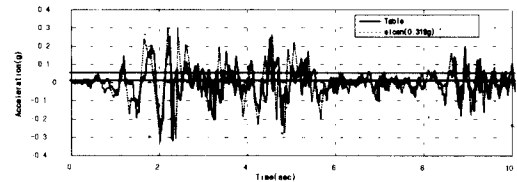
층	최대 변위 (cm)	최대 층간변위 (%)	최대 층전단력 (kg)	최대 층가속도 (g)
3층	0.9	1	14.25	1.25
2층	0.703	1.17	21.09	0.94
1층	0.378	1.26	27.44	0.67



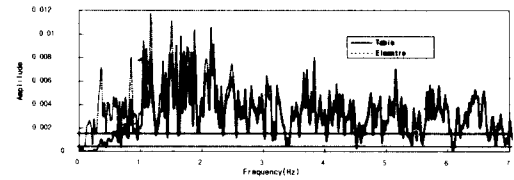
(a) Desired base motion



(b) Achieved base motion



(c) Comparison of the desired and achieved Base motion



(d) Comparison of Fourier transform

그림 8 Shaking table motion for the El-Centro NS base motion (PGA 0.319g)

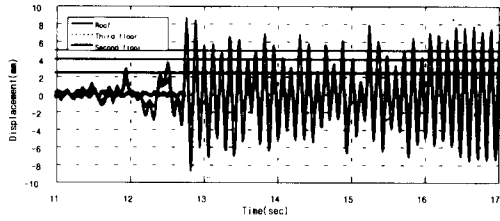
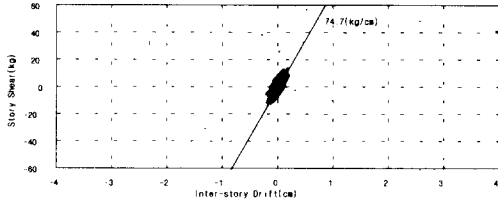
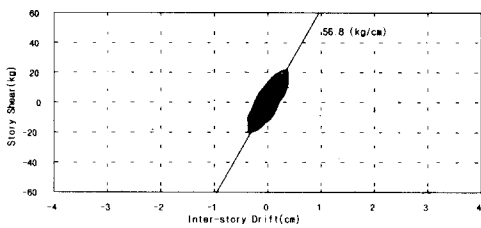


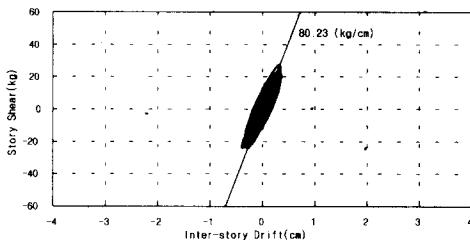
그림 9 Overlaid global response time history(PGA 0.319g)



(a) Third story



(b) Second story



(c) First story

그림 10 Story shear versus inter-story drift histories (PGA 0.319g)

4. 결 론

이상의 실험결과 분석에 의한 결론은 다음과 같다.

- (1) 자유진동실험 결과 모델의 거동이 거의 1차모드에 의해 지배되는 것을 볼 수 있으며 2차와 3차모드는 아주 약하게 나타났다.
- (2) 백색과실험(White noise)에서는 모델의 고유주파수는 자유진동실험결과와 거의 유사하나 감쇠계수는 아주 크게 나타났다.
- (3) 지진모의실험에서는 입력과 출력 진동대 가속도가 약간 틀리게 나타나고 있음을 알 수 있고, 감쇠에 의한 현상으로 층간변위와 층전단력의 관계에서 타원형의 에너지 흡수현상이 일어나고 있음을 알 수 있다.
- (4) 이 실험의 경우 최대 진동대 가속도가 0.318g인데 비해, 모델의 최대 응답 가속도가 1.25g로 나타나 그 동적 확대비는 3.93정도로 나타나고 있다.

감사의 글

본 논문은 1997년도 한국지진공학회 춘계학술발표대회에 발표된 것으로 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이 한선의 31명, "P.C 아파트의 내진 설계규준 제정을 위한 실험적 연구," 대한 주택공사, 1991. 12.
2. Paz, M., *Structural Dynamics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1985.
3. Anil, K, and Chopra, A., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, 1995.
4. Clough, R.W., and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 1975.