

편심을 가진 1/12 축소 RC 주상복합구조물의 진동대실험

Shaking Table Tests of 1/12-Scale RC Bearing-Wall System with Bottom Piloti Stories Having Eccentric Shear-Wall

이 한 선* 고 동 우** 권 기 혁*** 김 병 현****
Lee, Han Seon Ko, Dong Woo Kwon, Ki Hyuk Kim, Byung Hyun

ABSTRACT

The severe shortage of the available sites in the highly developed downtown area in Korea necessitates the construction of high-rise buildings which meet the need of residence and commercial activity simultaneously. The objective of this study is to investigate the seismic performance of this type of building structures.

For this purpose, two 1:12 scale 17-story reinforced concrete model structures were constructed according to the similitude law, in which the upper 15 stories have a bearing-wall system while the lower 2-story frames with infilled shear wall have two different layouts of the plan : The one has symmetric plan and the other has unsymmetric plan. Then, this model was subjected to a series of earthquake excitations. The test results show that the layout of shear wall has the negligible effect on the natural period and the base shear coefficient, but great effect on the failure mode of beam-column joint at flexible side frame.

1. 서론

최근 인구의 도시집중이 심화되고 교통 및 토지이용에 문제가 발생함에 따라 이를 효율적으로 해결하기 위한 방안으로 주상복합건물이 급증하고 있다. 이러한 주상복합건물의 경우 상부주거공간은 벽식구조로 되어 있고, 하부상가 또는 주차공간은 골조구조로 되어 있다. 또한 이러한 구조는 용도상 주간에는 상가로서 많은 유동인구가 발생하고, 야간에는 주거기능으로 인해 거주민이 많아 안전에 문제가 생길 경우 대형인명 사고로 발전할 가능성이 크다. 그러나 이런 구조는 그 구조시스템이 벽식구조인지, 골조구조인지, 아니면 기타구조인지에 대해 명확하게 규정되어 있지 않기 때문에 지진하중을 결정하는데 중요한 요소인 고유주기, 반응수정계수등의 산정이 불분명하여 지진하중을 결정하기가 모호하고, 상부벽식구조와 하부골조부분의 강성과 강도의 차이로 인한 수직적 비정형인 형태를 이루고 있으며, 코어의 위치에 따라 수평적으로도 비정형인 형태를 이루게 되므로 이에 따른 동적특성을 파악하기가 일반적인 방법으로는 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 4m×4m 진동대를 이용하여 1/12 축소 철근콘크리트 주상복합구조물의 실제 지진파에 대한 거동을 연구하였다.

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 부교수
** 정회원, 고려대학교 건축공학과 박사과정
*** 정회원, 서울시립대학교 건축공학과 조교수
**** 정회원, 한국기계연구원 책임연구원

2. 모델 실험체 및 실험장치

본 연구를 위하여 현재 우리나라에서 시공중인 철근콘크리트구조 주상복합건물을 조사한 후¹⁾ 하부골조부분 2층 상부벽식부분 15층의 전형적인 모델을 선정하였다. 건물설계 시 한국콘크리트학회에서 제정한 콘크리트구조설계 기준 및 해설²⁾과 대한건축학회에서 제정한 건축물하중조합 및 해설³⁾을 기준으로 설계하였다.

진동대의 성능을 고려하여 실험체의 축소율을 1/12로 결정하였으며, 그림 1에서 실험체의 입면과 평면을 보여주고 있다. 상부구조물의 경우 실물과 동일한 강성을 갖는 콘크리트덩어리로 제작하였으며, 하부골조프레임은 상사성⁴⁾을 만족하도록 실물을 그대로 축소제작 하였다. 대칭모델의 경우 내부프레임에 전단벽이 있는 경우이고, 비대칭모델의 경우 전단벽이 한쪽 프레임에 있어 수평으로 비정형인 모습을 보여주고 있다. 상부구조물의 경우 하부골조보다 강성이 훨씬 크기 때문에 실험체의 제작과 실험상의 편의를 위해 별도로 제작하여 실험할 때 하부골조와 볼트 접합하여 실험할 수 있도록 하였다. 그런데, 진동대 성능의 한계로 인하여 부가질량은 필요량의 1/2만 설치하였고, 이에 따라 표 1과 같은 별도의 상사성의 원리를 적용하였다.⁵⁾ 따라서, 질량이 감소함에 따라 수평력을 동일하게 묘사하기 위하여 모델에 적용되는 가속도는 실제의 2배를 적용하였다.

주근(D2)의 경우 요구되는 항복강도와 충분한 연성을

표 1 상사성 원리⁵⁾

Item		True replica model	Modified replica model
Length,	L	1/12	1/12
Area,	L^2	1/144	1/144
Force,	MLT^{-2}	1/144	1/144
Displacement	L	1/12	1/12
Acceleration	LT^{-2}	1	2
Frequency	T^{-1}	$\sqrt{12}$	$\sqrt{24}$
Time	T	$1/\sqrt{12}$	$1/\sqrt{24}$

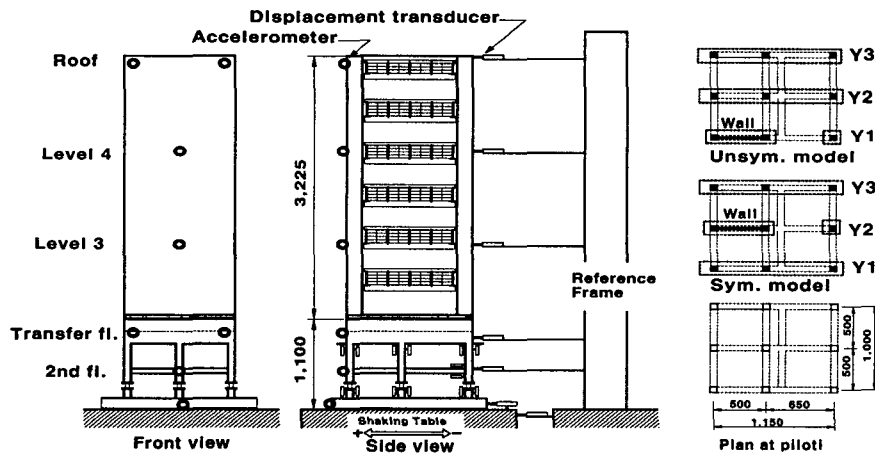


그림 1 실험체 세팅 (단위 : mm)

표 2 실험프로그램

Test	Model(PGA)	Prototype(PGA)	Remark (Return period ⁶⁾)
Taft011	0.11g	0.055g	
Taft022	0.22g	0.11g	Design earthquake $I_E = 1.0$ (500 years)
Taft030	0.3g	0.15g	$I_E = 1.5$ (1,000 years)
Taft040	0.4g	0.2g	Max. earthquake (2,000 years)
Taft060	0.6g	0.3g	Max. considered earthquake (5,000 years)
Taft080	0.8g	0.4g	

연고, 성분의 변질을 막기 위해 강선을 이형화 시킨 후 진공전기로서 열처리하여 사용하였으며, 전단철근($\phi 1.1$)은 시중에서 판매하는 철사를 사용하였다. 주근과 전단철근의 항복강도는 각각 $4,689\text{kgf/cm}^2$ 와 $5,001\text{kgf/cm}^2$ 로 공칭항복강도($4,000\text{kgf/cm}^2$)보다 각각 17%와 25% 높게 나왔다. 모델콘크리트는 골재를 축소율만큼 줄인 후 중량비 0.4:1:1:1.1 (물:시멘트:잔골재:굵은골재)로 배합한 결과 28일 평균강도는 352kgf/cm^2 로 나타났다.

본 실험은 대덕연구단지에 위치한 한국기계연구원 4m×4m 6자유도 진동대에서 실험을 수행하였다. 실험체의 동적특성을 알아보기 위해 지진모의실험(Earthquake Simulation Test) 전과 후에 백색파실험(White Noise Test)을 수행하여 지진에 의한 구조물의 동적특성의 변화를 살펴보았다. 지진모의실험을 위해서 사용된 지진파는 Taft N21E성분으로 표 2에 나타낸 바와 같이 입력지진파의 최대 가속도 크기를 조정하였으며, 시간축은 상사성의 원리에 따라 $1/\sqrt{24}$ 로 줄였다.

3. 실험결과

3.1 모델의 동적특성 변화

그림 2에서는 두 가지 실험체에 대한 고유주기의 변화를 보여주고 있다. 우리나라의 하중기준 및 해설에서 제시하는 기타구조의 고유주기 산정식에 해당하는 0.188sec.와 비교했을 때, 대칭모델과 비대칭모델이 각각 0.149sec.와 0.156sec.로서 80%정도 작은 값을 보여주었다. 실험강도가 증가하면서 실험체의 고유주기는 지속적으로 증가하여 Taft080실험 후에는 대칭모델은 0.193sec.로 1.3배만 증가한 반면, 비대칭모델은 0.292sec.로서 1.9배까지 증가하였다.

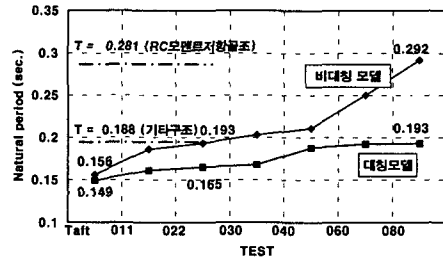


그림 2 고유주기 변화

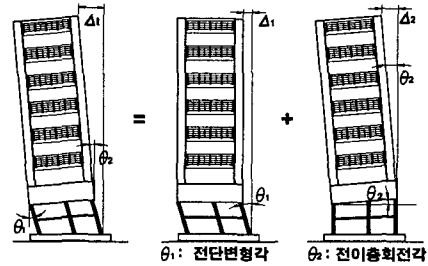
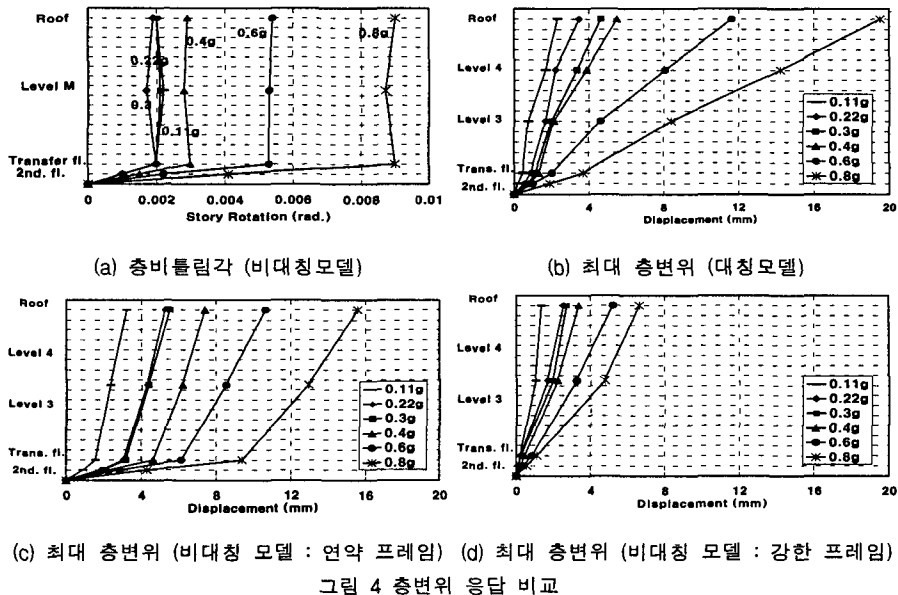


그림 3 지붕층 변위



3.2 횡변위 거동

지붕층변위는 그림 3에서 볼 수 있듯이 하부골조의 전단변형에 의한 변위와 상부골조에 작용하는 전도모멘트에 의해 전이층이 회전함으로써 발생하는 변위로 구분하여 볼 수 있다. 그림 4(a)에서는 비대칭모델의 층비틀림각을 보여주고 있다. 층비틀림은 대부분 하부골조층에서 발생하였으며, Taft 060을 넘어서면서 급격히 증가하였다. 그림 4(b)에서는 대칭모델의 실험단계별 최대층변위를 보여주고 있고, 그림 4(c)와 (d)는 비대칭모델의 연약프레임과 강한프레임의 최대층변위 변화를 보여주고 있다. 대칭모델의 경우 하부골조의 전단벽으로 인해 구조물 전체적으로 비슷한 층간변위율을 보여주었다. 반면 비대칭모델을 보면, 강한 프레임의 경우 Taft030과 Taft080에서 각각 0.03%와 0.14%로 대칭구조물의 0.28배와 0.3배에 불과한 반면, 연약 프레임은 Taft030과 Taft080에서 각각 0.41%와 1.22%로서 대칭모델의 2.7배와 2.5배로 연약 프레임과 강한 프레임 사이에 극심한 차이를 보여주었다. 전체변위에 대한 전이층의 비율도 비대칭모델의 연약 프레임의 경우 48%와 70%로 지진동이 강해질수록 하부층의 전단변형비율이 급증하였다. 전도모멘트에 의한 상부구조물의 횡변위각을 비교하면, 대칭모델의 경우 Taft030과 Taft080 일 때 각각 0.1%와 0.46%를 보여주었고, 비대칭모델의 경우 각각 0.07%와 0.24%로 작은 값을 보여주었다. 따라서, 대칭모델의 경우 지진동이 강해질수록 전도모멘트에 의한 거동이 지배를 한 반면, 비대칭모델의 경우 하부골조의 비틀림거동이 전체거동을 지배하는 것으로 나타났다.

3.3 밀면전단력과 전이층변위의 관계 VS. 전도모멘트와 전이층회전각의 관계

밀면전단력은 구조물의 가속도와 질량의 곱으로부터 구하였으며, 이를 통해 측정된 전단력을 바탕으로 계산한 밀면전단계수의 변화를 그림 5에서 보여주고 있다. 설계지진하중에 해당하는 Taft030에서 대칭모델과 비대칭모델 각각 0.128과 0.135로서 설계밀면전단력과 비교했을 때 2.6배와 2.7배를 보여주고 있으며 지진동이 강해지면서 두 모델이 비슷한 양상을 보이면서 지속적으로 증가하였다. 그림 6은 밀면전단력과 전이층변위의 관계를 보여주고 있다. 우리나라의 설계지진하중에 해당하는 Taft030에서 비대칭모델의 전이층 강성은 1.120 tf/mm로서 대칭모델의 전이층강성의 0.52배를 보여주었으며, 비대칭 구조물의 에너지소산량이 큰 것을 볼 수 있다. 그림 7은 전도모멘트와

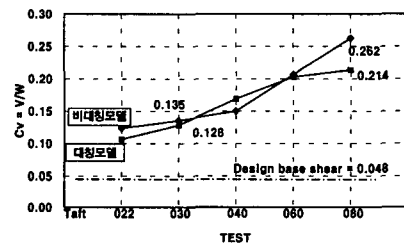
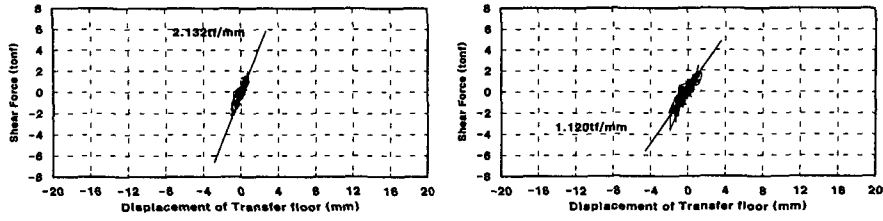


그림 5 전단계수 비교

전이층회전각의 관계를 보여주고 있다. 전도모멘트는 상부구조물에 작용하는 가속도의 평균과 상부구조물의 질량을 곱하여 구한 횡력에 해당위치로부터 전이층까지의 거리를 곱하여 구한 모멘트이다. 전도모멘트로 인해 하부골조의 기둥에서는 축변형이 생김으로써 전이층에서 회전이 발생하게 된다. 설계지진하중에 해당하는 Taft030에서 비대칭 모델의 전도모멘트강성(M_t / θ_t)이 8,815 tf-m/rad.로서 대칭모델의 전도모멘트강성의 1.36배를 보여주었다.

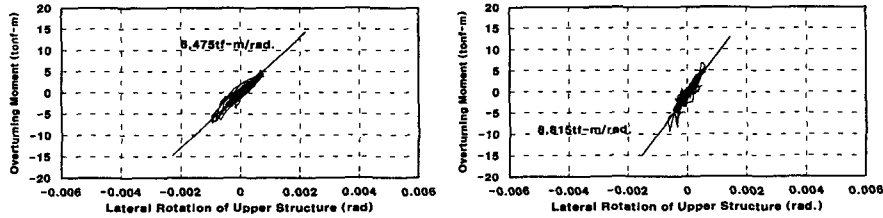
3.4 파괴양상

두 개의 모델 모두 1층벽체의 이어치기한 부분에서 미끌림파괴가 발생하였고, 2층기둥의 상부에서 수평방향균열이 발생하였다. 그림 9(a)는 대칭모델의 균열 양상을 보여주고 있다. 외부기둥의 로드셀하부에서 압괴가 발생하였고 보와 기둥의 접합면에서 균열이 발생하였다. 그림 9(b)는 비대칭모델의 균열양상으로 연약프레임의 보와 기둥 접합 부분에서 균열이 집중되었으며, 외부프레임의 접합부에서도 사인장균열이 발생하였다.



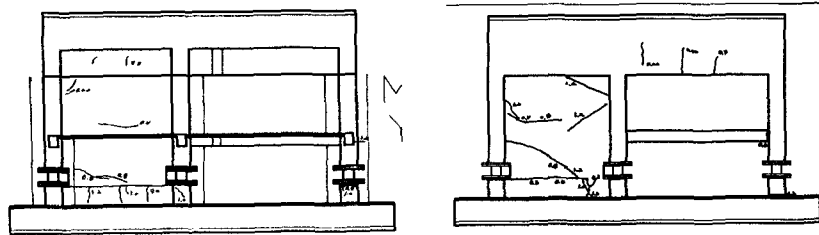
(a) 대칭모델 (b) 비대칭모델

그림 6 전단력과 전이층변위의 관계 (Taf030)



(a) 대칭모델 (b) 비대칭모델

그림 7 전도모멘트와 상부구조물의 횡변위각



(a) 전체균열 양상 (대칭모델) (b) 전체균열 양상 (비대칭모델)

그림 8 균열 양상

4. 설계식과 비교

실제구조물에 대한 전단력을 우리나라의 하중기준 및 해설³⁾에 따라 아래와 같이 구하였다.

$$V = C_s \times W = \left(\frac{A I_E C}{R} \right) \times = (0.048) \times (2,423) = 116 \text{ tonf} \quad (1)$$

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} = 0.868 \quad (2)$$

여기서, V : 설계밀면전단력, C_s : 지진계수, A : 지역계수 (0.11:지역 1), I_E : 중요도계수 (1.5), S : 지반계수 (1.0), T : 고유주기, R : 반응수정계수 (3.0: 내력벽방식), W : 구조물의 자중을 의미한다. 고유주기를 구하는 식은 하중기준 및 해설에서 기타구조에 대한 경험식으로 제시하는 아래와 같은 식을 적용하였다.

$$T = 0.048 (h_n)^{3/4} = 0.922 \text{ sec.} \quad (3)$$

여기서 h_n 은 m단위인 구조물의 높이를 의미한다.

이상과 같이 구한 값을 상사성의 원리에 따라 환산하여 실험값과 비교한 결과를 표 3에서 보여주고 있다. 상사성을 고려하면 Taft022가 실물의 설계지진하중에 해당하는 0.11g이나, 실물설계 시 중요도계수를 1.5로 적용하였기 때문에 이를 고려하면 지진하중은 0.144g가 그에 해당하여⁶⁾, Taft030의 실험결과와 설계시 구한 값을 비교하면 다음과 같다. 1) 고유주기의 경우 진동대실험 전에 측정된 고유주기가 하중기준 및 해설에서 제시하는 고유주기와 비교했을 때 대칭모델과 비대칭모델 모두 80%정도의 값을 보여주어 고유주기 산정에 있어서 건물의 수평적 대칭 여부는 중요하지 않았다. 2) 밀면전단 계수는 설계밀면전단력에 비해 Taft030에서 대칭모델은 2.6배, 비대칭모델은 2.8배를 보여주어 비슷한 값을 보여주었다. 3) 층간변위율은 모든 실험에 대해 1.5%이내에 들어 변위제한은 문제가 되지 않음을 보여주고 있다.

표 3 설계변수의 비교

		T (sec.)	Cs (=V/W)	Vmax. (tf)	Inter-story drift index at piloti story(%)
Design (AIK)		0.188	0.048	0.80	1.5
대칭 모델	Taft030	0.149*	0.128	2.18	0.15
	Taft080	0.193	0.214	3.63	0.48
비대칭 모델	Taft030	0.156*	0.135	2.3	0.412** / 0.032***
	Taft080	0.292	0.262	4.46	1.219** / 0.134***

* 실험전 고유주기, ** 연약 프레임의 층간변위율, *** 강한 프레임의 층간변위율

4. 결론

본 연구의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대칭인 구조물의 경우 상부구조물의 전도모멘트에 의한 변형이 큰 비중을 차지했으나, 비대칭 구조물의 경우 전도모멘트보다는 연약 프레임의 전단변형이 큰 비중을 차지했다.
- (2) 하부골조의 전단벽의 양이 동일하다면 배치는 고유주기를 결정하는데 큰 영향을 미치지 않았으며, 실험결과 우리나라의 하중기준 및 해설에서 제시하는 값의 80%의 값을 보여주었다.
- (3) 비대칭구조물의 경우 연약프레임의 접합부에서 과도한 비틀림 현상으로 인한 접합부 균열이 발생하였다.
- (4) 주상복합건물의 반응수정계수는 대칭인 구조물과비대칭인 구조물 모두 3보다 작은 1.2정도가 적당하였다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 건설교통부 국책과제인 "복합구조(전단벽+골조)의 내진설계기법 연구"의 일부로 수행되었으며, 건설교통부와 참여업체인 쌍용건설(주), 대한주택공사, 코오롱건설(주), (주)형상구조안전의 지원에 감사드리며, 진동대실험에 도움을 주신 한국기계연구원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이한선 외, "상부전단벽과 하부골조로 구성된 복합구조의 설계실무 현황 분석," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 11권 1호, 1999
2. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준, 해설," 한국콘크리트학회, 2000
3. 대한건축학회, "건축물 하중기준 및 해설," 대한건축학회, 2000
4. P. Zia, "Principles of Model Analysis," ACI sp-24, Michigan, 1970
5. Hiroshi Hosoya, "Shaking Table Tests of Three-Dimensional scale Models of Reinforced Concrete High-Rise Frame Structures with Wall Columns," ACI Structural Journal, Vol 92, No.6, 1995
6. 건설교통부 (1997), "내진설계기준연구(II)-내진설계성능기준과 경제성평가," 건설교통부