

비내진 설계된 철근콘크리트 건축물의 진동대 실험 연구

조 문 철 · 권 기 혁

Shaking Table Test of Single Story Model of R.C Building Designed
by Non-seismic Code

Joe, Moon Cheal · Kwon, Ki Hyuk

ABSTRACT

Earthquake is ground accelation that caused mainly by the fracture of the crust of the earth or by the sudden movement along an already existing fault. The Korean Peninsula lies within the moderate low intensity area of seismic hazard map. Therefore its seismicity shows a very irregular strain release, Seoul area is considered as the potential area of high magnitude earthquake occurrence possibility. In 1988, the seismic design code of buildings were provided for the first time and lately changed. But those are the earthquake disaster management strategy only for new constructed building, so the buliding designed by non-seismic code are evaluated for their seismic performance. This evaluation is esssential factor to the earthquake disaster management strategy for the existing buliding.

The purpose of this study is to present the fundamental data for establishing the seismic performance evaluation of existing reinforced concrete buildings designed nonseismic codes with shaking table test. This paper reports the seismic behavior of RC buildings with changed natural periods.

Key Words : Earthquake, seismic design code, non-seismic code, existing
reinforced concrete buildings

1 서론

우리나라는 지진 구역상 중약진 지역으로 분류되어있다. 중약진 지역은 강진지역으로 분류되는 일본, 미국서부 지역처럼 지진발생 가능성은 낮으나, 무지진 지역에 속하지 않으므로, 지진발생 가능성이 전혀 없는 지역은 아니다. 최근의 국내 지진관측 결과와 역사 지진의 분석 결과를 토대로 우리나라의 지진발생 가능성, 특히 서울지역에서의 발생 가능성이 높다는 보고가 나오고 있다. 서울지역은 인구밀집 지역일 뿐만 아니라 다중이용시설이 밀집되어있는 지역적 특성을 가지고 있다. 또한 건축적으로 볼 때 철근콘크리트계 구조물이 건축군의 상당부분을 차지하고 있고 대부분 사용형태가 다중이용시설이라는 점에서 지진의 발생시 이들 건축물의 피해는 대규모 인명손실로 이어질 가능성이 높다.

1988년 건축물의 내진설계에 대한 기준이 제정되어진 이후 내진설계의 필요성이 강조되면서 최근에도 내진설계에 관한 규정이 강화되었지만 이러한 방재정책은 신축건축물에 대한 조치일 뿐이고 기존에 시공된 다수의 비내진 건축물에 대한 대응조치는 별도의 정책이 필요하다. 기존 건축물의 방재대책으로 가장 우선 선행되어야 하는 것은 현 건축물이 지진에 대해 어느 정도의 저항능력을 확보하고 있는가를 평가하는 것이며 이 평가를 근거하여 보수, 보강정도 및 필요성을 판단하여야 할 것이다. 건축물의 내진성능평가에 있어서 기본적인 자료는 구조체의 강성과 연성에 대한 자료이며 이러한 자료들은 다양한 실험과 이론적 연구를 통하여 얻어질 수 있다. 국내에서도 철근 콘크리트의 강성과 연성을 파악하기 위

한 연구들은 다수 진행되어 왔다. 그러나, 현재까지 진행되어온 연구는 평면 골조에 정적인 반복 가력을 통해서 건축물의 이력 복원력 특성을 파악하는데 국한되어 왔으며 실제 지진파와 유사한 진동 가력을 사용한 실험의 예는 미미한 실정이다. 진동대를 이용한 동적 가력 실험은 건축물이 가지고 있는 동적특성을 반영하여 건축물의 응답특성을 반영하여 건축물의 응답특성을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구는 비내진 설계된 철근콘크리트 건축물의 지진에 대한 동적응답특성을 파악하기 위하여 상사법칙에 따라 축소 제작된 입체 골조 모델에 실제 지진파와 유사한 진동을 서울시립대학이 보유한 진동대를 사용해 가력 하였다. 건축물의 동적응답 특성을 결정하는 가장 기본 요소인 고유주기가 철근콘크리트 건축물의 내진성능에 미치는 영향을 파악하여 비내진 설계로 시공된 철근콘크리트 건축물의 내진성능 평가를 위한 기초자료를 제시한다.

2 실험 계획

1. 개요

고유주기의 변화가 건축물의 지진응답특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 고유주기가 다른 3개 형식의 시험체를 계획하였다. 각 시험체는 실험 여건상 실제 모델에 의한 실험이 불가능 하므로 진동대의 사양과 성능을 고려하여 상사성의 원리에 근거하여 실제 건축물과 유사하도록 제반요소들을 고려한 1/8축소 시험체로 제작되었다. 표준 시험체에 대한 치수는 그림1에 진동대의 사양은 표1에 제시하였다. 진동대에 의

해 입력되어지는 지진파는 TaftN21E 파로 하였다.

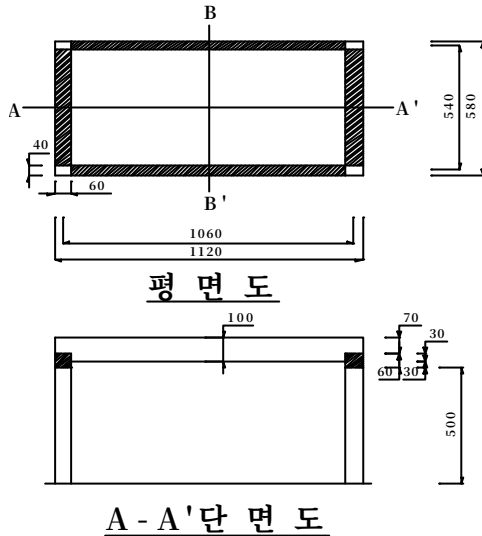


그림 1. 표준실험체 도면

표 1. 진동대의 성능사양

구 분	규 격
실험대상중량	10tonf
진동Table 크기	3m×3m
가진방향	1축 1방향
가진주파수범위	0.01Hz~100Hz
최대변위	±100mm
최대가속도	10.0G

2. 시험체 및 실험방법

1) 시험체 계획

본 연구를 위하여 지하층이 없는 RC골조의 최하층부를 상사성의 원리에 의해 제작하였고 상층부는 최하층부의 중앙기둥이 받는 축력을 기둥단면이 지니는 항복 축력의 20%라고 가정하여 모델 기둥이 $0.2N_y$ 를 유지하도록 질량을 설치 하였다. 고유주기가 다른 세가지 type의 시험체를 표1과 같은 특징으로 제작하였다. 진동대의 성능을 고

려하여 축소율은 1/8로 결정하였고 기둥과 보의 치수 및 배근은 그림2에 나타나있다.

	기둥	보1	보2
C E N			
E N D			

그림 2. 배근상세

표 2. 시험체 형상

	1형	2형	3형
Span	1bay*1bay	1bay*1bay	1bay*2bay
Story high	500	700	500
Natural period	0.33	0.6	0.24

2) 상사성의 원리

시험체가 1/8축소된 모델이므로 시험체 제작시 축소율에 따른 상사성의 원리를 적용하여야 한다. 축소된 재료의 응력과 변형도가 실물(Prototype)과 일치하고 적용 중력계수가 동일한 경우, 축소모델의 동적 실험에 사용되는 상사성의 원리에 의하면, 실물(Prototype)의 길이에 대해 1/8로 축소된 모델의 질량은 실물(Prototype)의 $1/8^2$ 로 줄여야 하고 실제로 그 부피가 $1/8^3$ 이 됨으로써 질량에서의 차가 발생하여 이를 보정할 필요성이 발생하게 되어 인공적인 부가 질량을 추가하여야 한다. 그렇지만 본 연구에서는 건축물의 1층부만으로 고유주기를 조정하였기 때문에 상부층 질량 또한 부가

질량으로 고려하였고 이 과정에서 적재하중에 대한 고려는 배재하였다.

표 3. 상사성의 원리

Items	Dimension	Similarity ratio
Length	l	L
Area	A	L ²
Density	m	M
Young's modulus	E	ML ⁻¹ T ⁻²
Strain	ε	1
Stress	σ	ML ⁻¹ T ⁻²
Force	P	MLT ⁻²
Displacement	x	L
Velocity	$\dot{x}$	LT ⁻¹
Acceleration	$\ddot{x}$	LT ⁻²
Frequency	f	T ⁻¹
Time	t	T
Drift angle	R	1
Base shear coefficient	C _F	1
Axial stress for long sustained loading	α_0	ML ⁻²

3) 사용재료의 특징

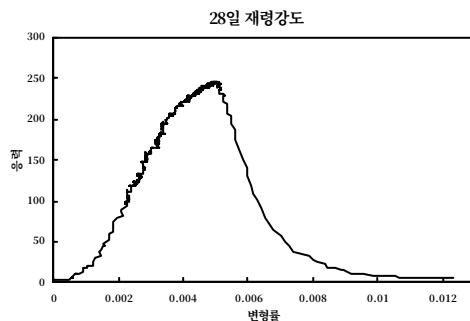


그림 3. 콘크리트 강도

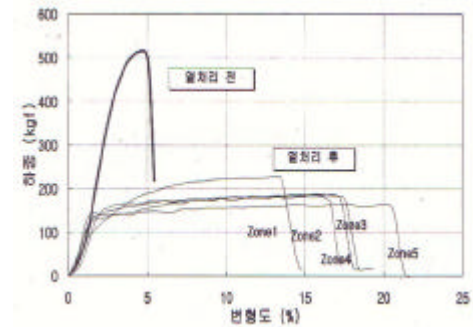


그림 4. 열처리 전후의 철근 하중 변형률

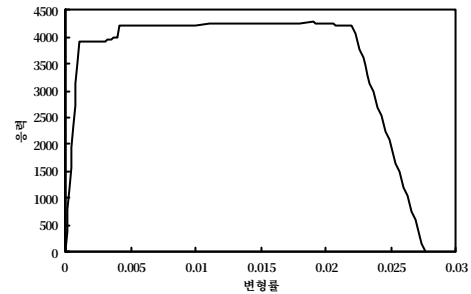


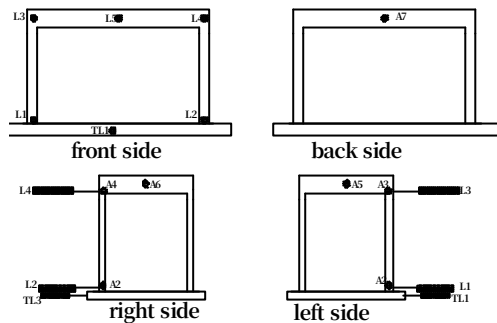
그림 5. 띠철근의 응력 변형률

모델 콘크리트는 골재를 축소율에 맞게 줄여 완전 건조된 상태로 5.2mm체를 통과하고 1.1mm체에 남은 것을 굵은 골재로 사용하고 1.1mm체를 통과한 것을 잔골재로 사용하였고 시멘트는 시중에서 판매되는 포틀랜드 시멘트를 사용하여 중량비 0.4:1.0:1.6:1.8(물:시멘트:잔골재:굵은골재)로 배합하여 28일 평균강도 250kg/cm²를 얻었다. 그림3에서 중량 배합한 콘크리트의 압축테스트에 의한 응력 변형률 곡선을 보여주고 있다.

D2.8 이형철근을 주근으로, $\phi 1.0$ 철사를 띠철근으로 사용하였으며, 주근은 $\phi 3$ 강선을 성분의 변질을 막기 위해 이형화 후 열처리하여 충분한 연성과 만족하는 항복강도(3,980kg/cm²)를 얻었고 띠철근은 기성 철사 중 공칭항복 강도와 가장 비슷한 항복강도(4,320kg/cm²)를 가진 철사를 선택하여

사용하였다. 그림 4는 $\phi 3$ 강선의 열처리전후의 강도저하와 연성의 증가를 보여 주고 있다. 그림 5는 띠철근의 용도로 선택된 철사의 응력 변형도 곡선을 보여주고 있다.

4) 실험방법

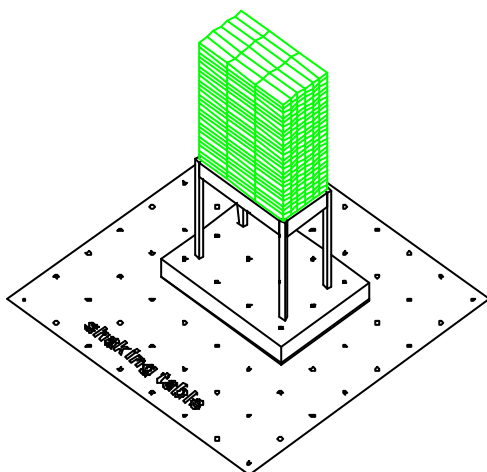


라벨	L1~L2	L3~L5	A1~A4	A5~A6
GAIN	100mm	200mm	5G	10G

그림 6. 계측기의 위치

시험체 및 측정기구의 설치상황은 그림 6,7과 사진1에 나타내었다.

시험체의 진동 특성을 알아보기 위하여 실험전후 자유진동 실험을 수행하여 이력 지진에 의한 구조물의 동적특성 변화를 알아보았다.



림 7. 시험체 및 부가질량 설치상황



사진 1. 시험체 Setting 상황

지진모의실험에 사용된 입력지진동은 Taft N21E 지진가속도 성분으로 시험체의 축소율에 맞는 정확한 재현을 위하여 다음과 같은 상사성의 원리에 따라 가속도 성분의 시간축을 조절한 후 실험을 수행하였다. 상사성의 원리에 의하면 모델에 대한 원형 지진가속도의 축소비(S_A)는 아래와 같다.

$$S_A = \frac{\text{Model의 가속도}}{\text{Prototype의 가속도}} = 1.0$$

이때, 원형(Prototype)과 모델의 가속도를 무차원 항으로 바꾸어 정리하면, 아래와 같이 된다.*

$$S_A = \left(\frac{L_M T_M^{-2}}{L_P T_P^{-2}} \right) = 1.0 \Rightarrow \left(\frac{T_M}{T_P} \right)^{-2} = \left(\frac{L_P}{L_M} \right)$$

$$\therefore S_T = \left(\frac{T_M}{T_P} \right) = \left(\frac{L_P}{L_M} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{L_M}{L_P} \right)^{\frac{1}{2}} = (S_L)^{\frac{1}{2}}$$

* 홍성진 외, 1991, “지진을 받는 1/2 축소 2층 철근콘크리트 라멘 구조물의 동적 거동에 관한 연구 ()”, 대한건축학회논문집 제7권 제3호 307-317쪽

표 4. 입력단계

단계		Remark (Return period)*
0	자유진동	
1	0.02	
2	0.03	
3	0.07	
4	0.10	
5	0.11	Design earthquake (500year)
6	0.14	
7	0.18	
8	0.20	Max. Earthquake (1000year)
9	자유진동	
10	0.26	
11	0.30	Max. Considered earthquake (2000year)
12	자유진동	
13	0.36	
14	자유진동	

본 실험에서는 모델에 대한 원형 (Prototype)길이의 축소비(SL)가 1/8이므로 시간의 축소비(ST)는 $1/\sqrt{8}$ 이 된다. 따라서 입력지진동 Taft-011 시간이력곡선은 그림8와 같다.

실험에 입력한 지진가속도는 시간축을 $1/\sqrt{8}$ 로 줄인 Taft-011을 표4과 같이 최대 가속도 크기를 조절하여 단계별로 입력하였다.

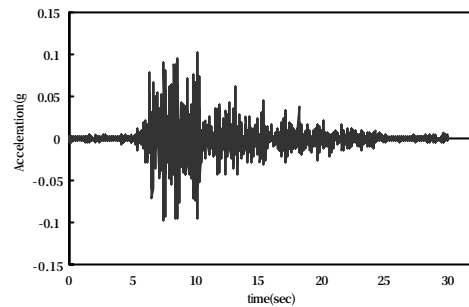
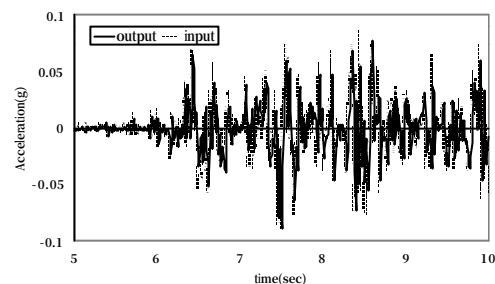


그림 8. 입력 지진동 Taft-011

3 실험 결과 분석

1. 진동대의 거동



그림

9. 입력파와 출력파 비교

진동대 System을 통한 지진파가 정확하게 재현되는지를 검토하기 위해 모델 2형의 입력가속도와 모델의 기초부분에서 취득한 가속도를 비교한 결과 그림9와 같이 일부 Peak점에서 약간의 차이를 보이나, 지진파의 형태가 대체로 일치하게 나타나 진동대 System이 지진파를 정확하게 재현함을 알 수 있었다.

2. 균열양상

모든 시험체가 접합부 기둥에서 균열이 시작되고 실험단계의 증가에 따라 기둥상부 띠철근 간격으로 수평균열이 발생하고 기둥 하부와 접합부의 보의 균열이 진행되었다.

* 장승필 외, 1997, “내진설계기준연구()-내진설계성능기준과 경제성평가”, 건교부



(a) 1형 (b) 2형 (c) 3형

사진 2. 각 시험체의 균열양상

1형의 시험체의 경우에는 변위 측정용 철판의 보강효과가 나타나 철판아래쪽 기둥부위에서 균열이 먼저 발생하였고 3형 시험체는 가장 많은 축력을 받는 중앙 기둥에서 가장 균열이 심하게 나타나 손상이 심해짐을 볼 수 있었다.

3. 동적특성

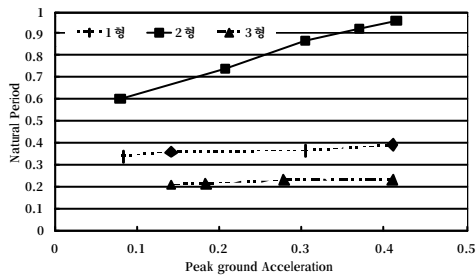


그림 10. 고유주기 변화

그림 10에서는 시험체별 고유주기의 변화를 보여주고 있다. 모든 시험체가 가속도의 증가와 함께 고유주기가 지속적으로 증가하였으면 특히 2형 시험체는 접합부 균열이 발생하면서 고유주기가 큰 폭으로 증가하였다. 원래의 시험체가 가지는 고유주기가 낮을수록 가속도의 증가에 더딘 고유주기의 변화를 나타내는걸 관찰할 수 있다.

4. 밀면 전단력과 층 변위의 관계

밀면 전단력은 구조물의 가속도와 질량의 곱으로 구하였으며, 이를 통해 계산된 밀면 전단 계수를 그림 11에서 보여 주고있다. 밀면 전단력 계수 값들의 변화는 세 형태의 시험체 모두 비슷한 양상을 보임을 알 수 있고 2형 시험체는 지반가속도 0.25g 지점에서 큰손상이 생기면서 밀면 전단력 계수가 감소함을 볼 수 있다.

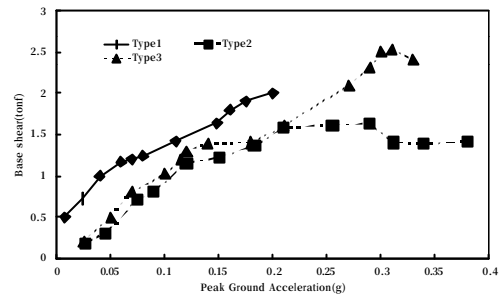
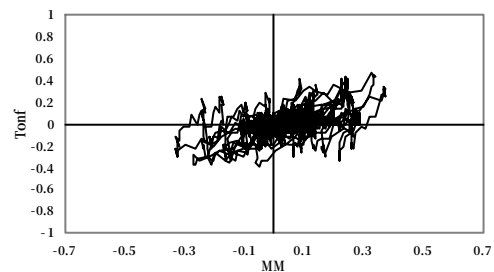
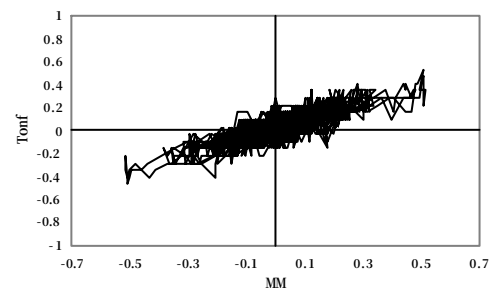


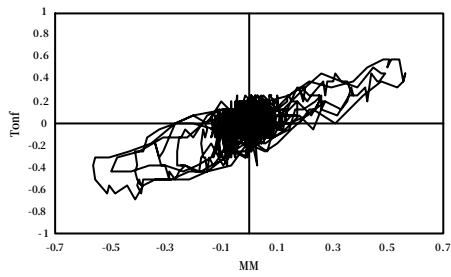
그림 11. Type별 밀면 전단력 비교



a) 1형 - 22gal

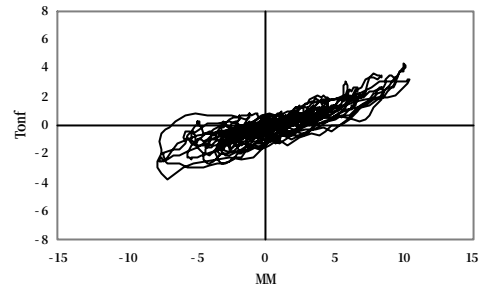


b) 2형 - 25gal

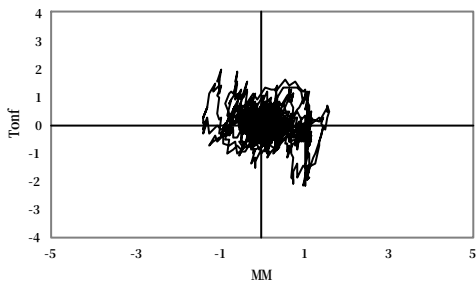


c) 3형 - 26gal

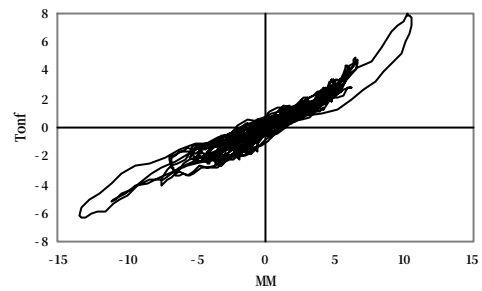
그림 12. Type별 밀면 전단력과 층 변위 비교(20gal)



a) 2형 - 280gal



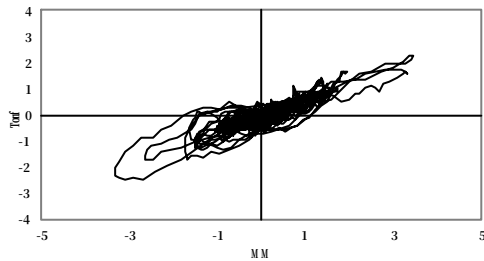
a) 1형 - 110gal



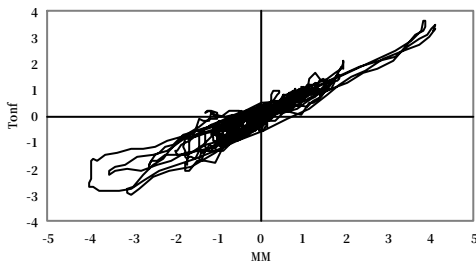
b) 3형 - 280gal

그림 14. Type별 밀면 전단력과

층 변위 비교 (280gal)



b) 2형 - 103gal



c) 3형 - 110gal

그림 13. Type별 밀면 전단력과

층 변위 비교 (110gal)

그림 12,13,14에서는 최대입력 가속도에 따른 시험체별 전단력과 층 변위를 비교 하였다. 그림에서와 보면 탄성구간에서는 2형 시험체가 안정적이고 우수한 거동특성을 보이지만 소성 구간으로 진행함에 따라 급격한 에너지 흡수능력의 저하가 발생함을 볼 수 있다. 또, 여기서 1span 시험체 보다 2span 시험체가 탄성구간이 길고 에너지 흡수율도 높다는 것을 관찰할 수 있고 또 고유주기가 짧은 시험체가 에너지 흡수에 유리하다는 것도 관찰할 수 있다.

4 결론 및 추후과제

본 연구는 철근콘크리트 골조의 지진 응답에 특성을 파악하기 위하여 고유주기가 다른 3종류의 입체 축소 시험체에 대해 모의진동실험을 행하여 다음과 같은 결과를

얻었으며 이 결과들은 모의 진동파로 선정된 TaftN21E의 진동 특성에 큰 영향을 받았음을 알 수 있다. 따라서 Taft파와 전혀 다른 진동 특성을 갖는 모의 지진동에서는 본 실험과 다른 결과를 예측할 수 있으나 Taft파가 연구자들에 의해 기본적 지진파 중에 하나로 인정되고 있으므로 본 연구 결과가 국내의 건설된 철근콘크리트 건축물의 진동특성파악에 자료가 될 수 있으리라 본다.

1. 주기가 긴 구조체가 소성에 먼저 도달하고 같은 지진입력시 피해도 크다는 것을 알 수 있다. 이 실험에서 주기가 가장 긴 2형 시험체가 가장 피해가 컸고 중진(0.2g) 이상에서는 뒤틀림 현상이 일어남에 따라 피해가 더 커짐을 볼 수 있다.

2. 철근콘크리트 건축물의 1층부의 지진 피해 양상은 기둥상부, 기둥하부, 보 순서로 파괴되며 기둥에서는 균열이 진행됨에 따라 박탈현상이 발생하였다.

지진하중 재하시 파괴양상은 접합부의 기둥이 먼저 파괴되고 기둥하부, 접합부의 보 순서로 파괴에 이른다. 기둥의 파괴양상은 스트립 간격으로 균열이 발생되다가 피복이 박리되는 현상을 볼 수 있다. 철근 콘크리트 골조의 내진성능향상을 위해 피복두께가 확보되어야 할 것으로 사료된다.

3. 시험체 및 손상에 따른 고유주기의 변화는 입력가속도의 증가에 따라 세 시험체 모두 증가하였으나 2형 시험체에서 그 증가 속도가 두드러지게 나타났고 밀면 전단력의 변화는 초기 고유 주기에 따라 그 값이 변화된다.

본 연구는 진동특성파악을 위한 기초적 연구이며 추후에는 연성 특성과 강성변화, 층 수의 영향 등을 고려한 동적 가진 실험이 수행되어야 하며 지진파 별로 특징이 다른 지진파를 입력하여 다양한 연구 결과가 제시되어 이를 토대로 내진 성능 평가 기법의 확립과 지진피해 예상 시나리오의 완성에 기여하여야 할 것이다.

참고문헌

1. Aktan, A. E. et. al, 1983, "Experimental and Analytical Predictions of the Mechanical Characteristics of a 1/5-Scale Model of a 7-Story R/C Frame-Wall Building Structure", Earthquake Engineering Research Center, College of Eng., Univ. of California, Berkeley, California, Report No. UCB/EERC-83/13
2. Bertero, V. V. et. al, 1983, "Mechanical Characteristics Used in a 1/5 Scale Model of a 7-Story Reinforced Concrete Test Structure", Earthquake Engineering Research Center, College of Eng., Univ. of California, Berkeley, California, Report No. UCB/EERC-83/21
3. El-Attar, A. G. et. al, 1991, "Shaking Table Test of a 1/8 Scale Three-Story Lightly Reinforced Concrete Building", National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, Technical Report NCEER-91-0018
4. Marcial Blondet, J. et. al, 1980, "Evaluation of a Shaking Table Test Program on two Story Reinforced Co-

ncrete Frame", Earthquake Engineering Research Center, College of Eng., Univ. of California, Berkeley, California, Report No. UCB/EERC-80/42

5. Harris, H. G., Sabnis, G. M., 1999, "Structural Modeling and Experimental Techniques", 2nd Ed. CRC Press LLC.

6. Hiroshi Hosoya et. al, 1995, "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, pp.765-779

7. Noor, F. A., Boswell, L. F., 1992, "Small Scale Modelling of Concrete Structures", Elsevier Science Publishers Ltd.

8. Xilin Lu and Xiaohan Wu, 2000, "Study on a New Shear Wall System with Shaking Table Test and Finite Element Analysis", Earthquake Engineering and Struct. Dyn., pp.1425-1440

9. 홍성진 외, "지진을 받는 1/2 축소 2층 철근콘크리트 라멘 구조물의 동적 거동에 관한 연구()", 대한건축학회논문집, 1991. 6

10. 홍성진 외, "지진을 받는 1/2 축소 2층 철근콘크리트 라멘 구조물의 동적 거동에 관한 연구()", 대한건축학회논문집, 1992. 6

11. "철근콘크리트의 배근 지침에 관한 연구", 대한주택공사, 1990. 8

12. 秋山 宏(1987), 建築物 耐震極限設計, 제 2版, 東京大學出版會

13. 고동호 "축소모델 철근 콘크리트 보

의 휨부착 및 전단거동에 관한 상사성 실험 연구", 1998 고려대학교 석사학위 논문

14. 이한선 외, "1/12 축소 철근 콘크리트 주상복합구조물의 진동대 실험", 한국콘크리트학회 논문집 2001.4

15. 노희일, "철근콘크리트구조", 산업도서출판공사, 2000

16. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계 기준·해설", 기문당, 2000