

## 고층 RC 벽식 비정형 구조물의 지진거동에 관한 실험적 연구

### Experimental Study on the Seismic Response of High-Rise RC Bearing-Wall Structures with Irregularity

이 한선\*      고 동우\*\*  
Lee, Han-Seon      Ko, Dong-Woo

---

#### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the seismic response of high-rise RC bearing-wall structures with irregularity. For this purpose, three 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 have three different layouts of the plan : The first one is a moment-resisting frame system, the second has a infilled shear wall with symmetric plan and the third has a infilled shear wall with eccentricity. Then, these models were subjected to a series of earthquake excitations. The test results show the followings: 1) the existence of shear wall reduced greatly shear deformation at the piloti frame, but has almost the negligible effect on the reduction of the overturning-moment angle, 2) the frame with shear wall resists most of overturning moment in severe earthquake, 3) the torsional behavior is almost independent of the translational, 4) the absorbed energy due to the overturning deformation has the largest portion in the total absorbed energy.

---

#### 1. 서론

최근 도시로의 인구집중이 심화되고, 도시교통 혼잡과 새건물을 위한 가용대지의 부족으로 인한 문제해결을 위한 방안으로 주상복합건물이 건설이 급증하고 있다. 이러한 주상복합건물의 경우 상부주거공간은 벽식구조로 되어 있고, 하부 상가 또는 주차공간은 골조구조로 되어 있다. 이러한 구조는 대부분 상부벽식구조와 하부골조부분의 강성과 강도의 차이로 인해 수직적 비정형성을 가지고 코어의 위치에 따라 수평적 비대칭인 형태를 이루고 있어 지진시 대부분의 손상이 하부골조에 집중되는 현상은 과거 지진피해의 경험을 통해 잘 알려져 있다. 따라서, 본연구에서는 이러한 취약성을 가진 주상복합 건축구조물에 대해 4m×4m 진동대를 이용하여 1/12축소 철근콘크리트 주상복합구조물의 실제 지진에 대한 거동을 살펴봄으로써 전체 거동의 측면에서 연구하였다.

---

\* 고려대학교 건축공학과 교수, 정회원      \*\* 고려대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원

## 2. 모델 실험체 및 실험장치

본 연구에서는 진동대의 성능을 고려하여 실험체의 축소율을 1/12로 결정하여 그림 1과 같이 3가지 실험체, 하부가 골조로만 이루어진 모델 1, 내부골조에 전단벽이 있는 모델 2, 전단벽이 편심을 두고 배치된 모델 3을 제작하였다. 실험체 제작, 상사성의 원리 및 세팅에 대한 사항은 참고문헌<sup>3),4),5),6),7)</sup>에 언급되어 있다.

## 3. 실험결과

실험체의 동적특성을 알아보기 위해 지진모의 실험 전과 후에 백색파실험을 수행하여 지진에 의한 구조물의 동적특성 변화를 살펴보았다. 지진모의실험을 위해 사용된 지진파는 TaftN2IE성분으로 표 1에 나타난 바와 같이 입력지진파의 최대 가속도의 크기를 조정하였으며, 시간축은 상사성의 원리에 따라  $1/\sqrt{24}$ 로 압축하였다.

### 3.1 모델의 동적특성 변화

표 2는 매 실험 시 구한 밀면전단계수와 실험 전 각 실험체에 대해 수행한 백색파실험으로부터 구한 고유주기를 보여주고 있다. 여기서 밀면전단계수는 상사성의 원리에 따라 각 실험에서 최대 전단력을 실험체의 무게로 나눈 값을 다시 2로 나누어 구하였다. 실험결과 모델 1과 모델 2의 밀면전단계수는 거의 일치하여 전단벽의 유무가 밀면전단력의 크기에 영향을 미치지 않음을 알 수 있고, 그 값은 설계 밀면전단력 0.048보다 약 2.5배 큰 값을 보여주고 있다. 고유주기는 우리나라 하중기준 및 해설<sup>2)</sup>에서 제시하는 기타 구조의 고유주기 산정식에 해당하는 0.188초와 비교했을 때, 모델 1은 0.193초로 거의 일치하였으나, 모델 2는 0.149초, 모델 3은 0.156초로 약 20% 작은 값

표 2 밀면전단계수와 고유주기 변화

| TEST    | C <sub>s</sub> (C <sub>s</sub> = V/W) |         |         | 고유주기 (sec) |         |         |
|---------|---------------------------------------|---------|---------|------------|---------|---------|
|         | Model 1                               | Model 2 | Model 3 | Model 1    | Model 2 | Model 3 |
| Taft011 | 0.048                                 | 0.088   | 0.109   | 0.193      | 0.156   | 0.149   |
| Taft022 | 0.101                                 | 0.106   | 0.123   | 0.272      | 0.186   | 0.161   |
| Taft030 | 0.129                                 | 0.128   | 0.135   | 0.279      | 0.193   | 0.165   |
| Taft040 | 0.134                                 | 0.169   | 0.151   | 0.281      | 0.203   | 0.168   |
| Taft060 | 0.152                                 | 0.203   | 0.206   | 0.293      | 0.211   | 0.188   |
| Taft080 | 0.207                                 | 0.214   | 0.262   | 0.306      | 0.250   | 0.192   |
| Taft120 | -                                     | 0.247   | 0.370   | -          | 0.292   | 0.193   |

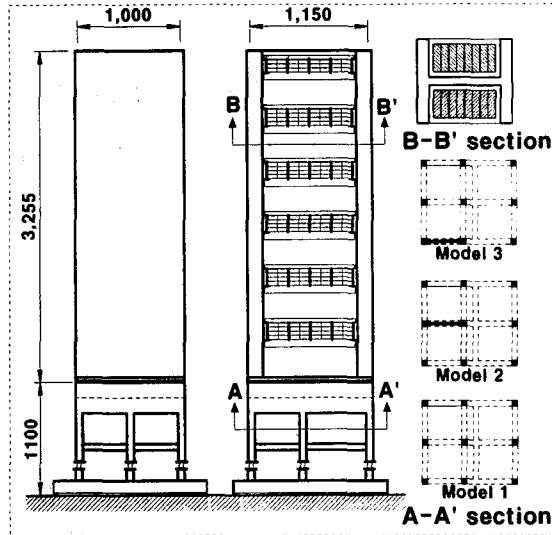


그림 1 실험체 개요 (단위 : mm)

표 1 실험프로그램

| Test    | Model (PGA) | Prototype (PGA) | Remark <sup>1)</sup>                     |
|---------|-------------|-----------------|--|
| Taft011 | 0.11g       | 0.055g          |  |
| Taft022 | 0.22g       | 0.11g           | Design earthquake                        |
| Taft030 | 0.3g        | 0.15g           | Design earthquake (I <sub>E</sub> = 1.5) |
| Taft040 | 0.4g        | 0.2g            |  |
| Taft060 | 0.6g        | 0.3g            |  |
| Taft080 | 0.8g        | 0.4g            | Max. earthquake                          |

을 보여주어 벽체가 있을 경우의 고유주기는 기준에서 제시하는 것과 차이가 있음을 알 수 있다. 실험체의 고유주기는 지진동이 커지면서 점차 증가하였다.

### 3.2 지붕변위

지붕변위는 그림 2에서 보듯이 하부골조의 전단변형에 의한 변위( $\Delta_1$ )와 상부골조에 작용하는 전도모멘트에 의해 전이층이 회전함으로써 발생하는 변위( $\Delta_2$ )로 구분할 수 있다. 그림 3에서는 Taft080일 때 각 실험체의 시간이력에 따른 지붕과 전이층 변위를 보여주고 있다. 모델3의 약한골조와 모델 1은 전단변형이 전체 변형의 50% 이상을 차지하여 하부골조에서 큰 변형이 발생하였으나, 벽체를 포함하고 있는 모델 3의 강한골조나 모델 2에서는 전단변형이 전체 변형의 15%정도로 나타났다. 전도모멘트에 의한 변형은 모델 1과 모델 2는 비슷한 값을 보여주고 있으나, 모델 3은 그보다 작은 값을 보여주었으며, 모델 3의 강한골조와 약한골조의 전도모멘트에 의한 변형은 거의 같은 값을 보여주었다. 이를 통해 하부골조의 전단벽은 하부골조의 전단변형 감소에는 큰 효과가 있으나, 전도모멘트에 의한 전이층의 회전에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그림 4는 매 실험시 지붕변위가 최대일 때 각 골조가 받는 전단력과 해당 골조의 전이층변위의 관계를 보여주고 있다. 모델 1의 경우 설계지진까지는 탄성범위에 있다가 Taft040을 넘어서면서부터 항복을 시작한 것을 확인할 수 있으며, 하부골조는 모든 기둥의 단면크기와 철근량이 동일함에도 불구하고 내부골조의 강성이 1.7배 큰 이유는 외부골조보

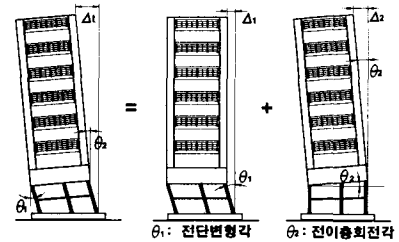


그림 2 지붕층 변위

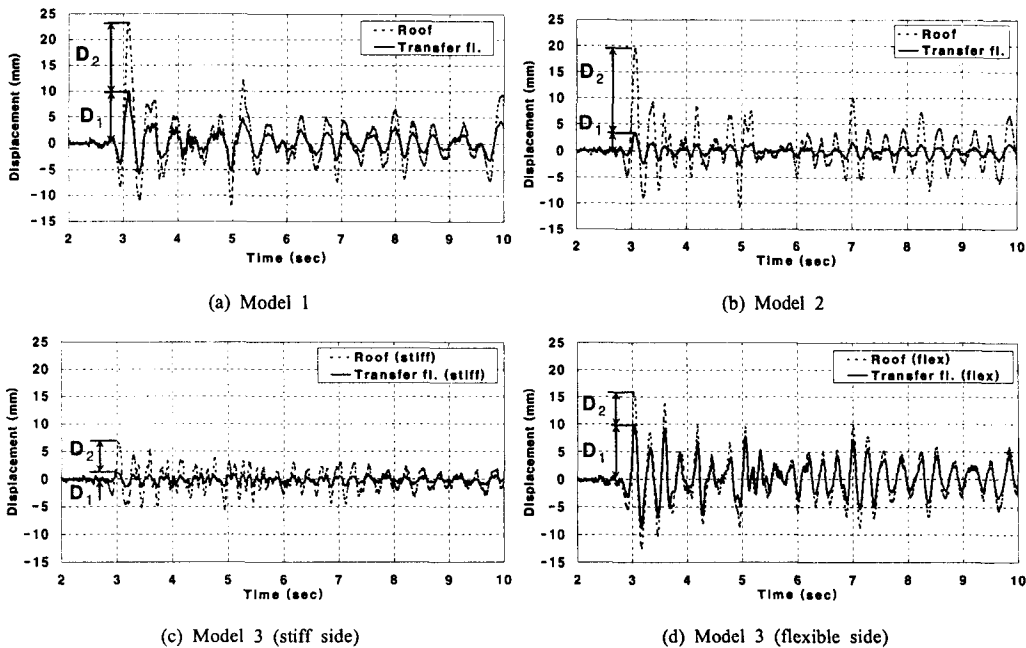


그림 3 시간이력에 따른 지붕과 전이층 변위 (Taft080)

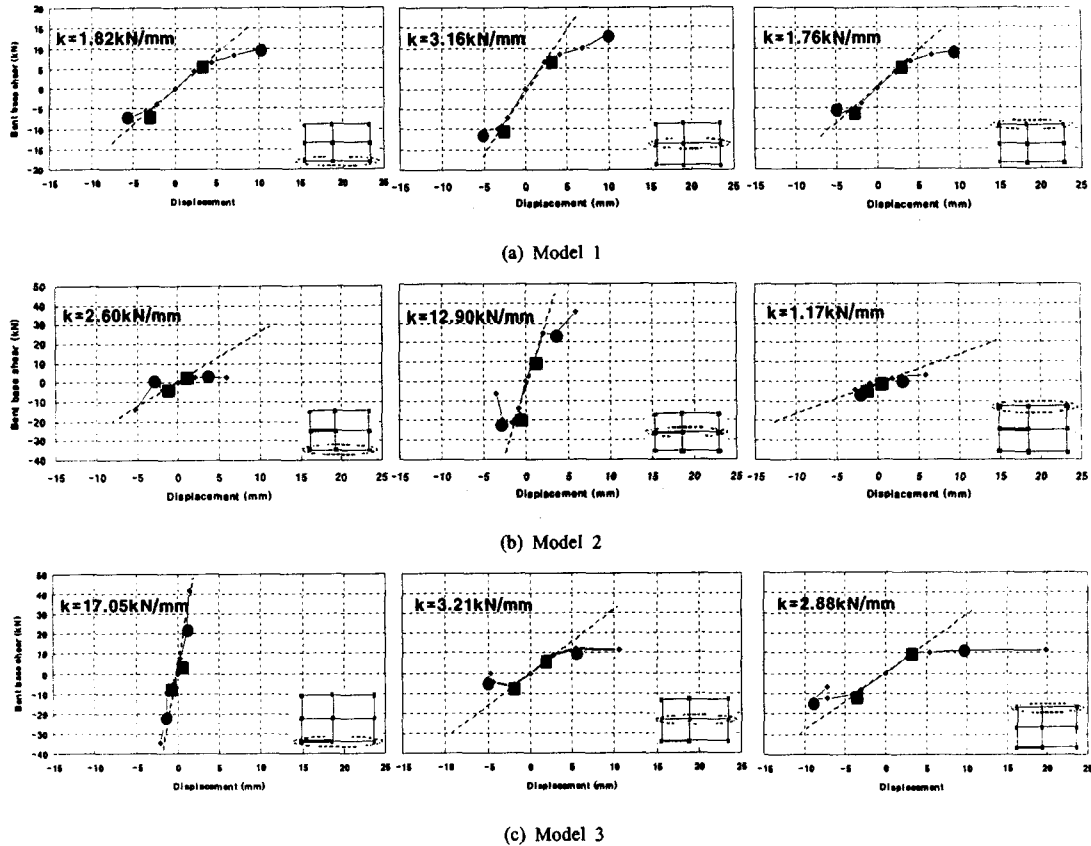


그림 4 골조별 전단력과 전이층변위의 관계 (■: Taft030 ●: Taft080)

다 내부골조에 작용하는 압축력이 크기 때문으로 생각된다. 모델 2는 전단벽을 포함하는 내부골조의 강성이 외부골조의 강성보다 6-7배 크게 나타났다. 또한 벽체는 Taft060까지 탄성적인 거동을 나타내었다. 전단벽이 편심을 두고 배치된 모델 3에서 강한골조의 강성은 연약골조의 5.9배, 중앙골조의 5.3배의 강성을 보여주었으며, 모델 3의 강한골조는 Taft120에 이르기까지 탄성영역내에 있음을 보여주고 있다. 그러나, 전단벽이 없는 내부골조와 약한골조는 Taft040을 넘어서면서 항복하였다

### 3.3 밀면 전도모멘트에 의한 거동

상부구조물에 작용하는 밀면 전도모멘트에 대해 하부골조는 기둥과 벽에 작용하는 축력과 모멘트로 저항한다. 본 연구에서는 각 부재의 모멘트를 측정하지 못하였고, 축력도 일부 기둥에서만 측정하였다. 따라서, 부분적으로 취득된 축력을 이용하여 하부골조가 전도모멘트에 저항하는 방식을 살펴보았다. 밀면 전도모멘트에 의하여 상부구조물이 그림 5와 같이 흔들림거동(rocking)을 한다고 가정하여 축력에 의한 모멘트를 그림 5 (a), (b)와 같이 각각 계산한 후, 이를 합한 값을 축력에 의한 저항 전도모멘트로 보았다.

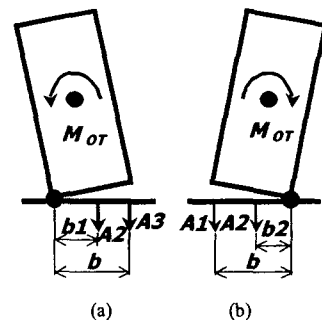
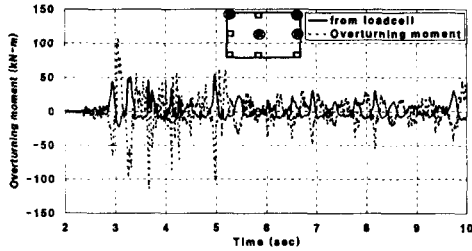
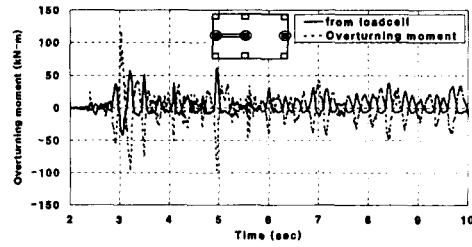


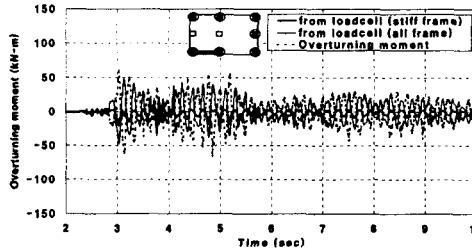
그림 5 흔들림거동에 대한 축력의 저항



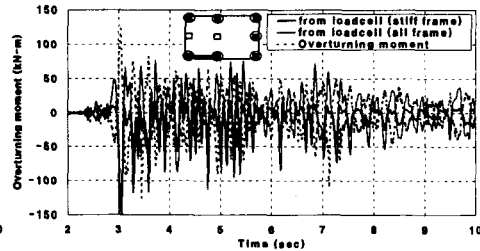
(a) Model 1 (Taft080)



(b) Model 2 (Taft080)



(c) Model 3 (Taft030)



(d) Model 3 (Taft080)

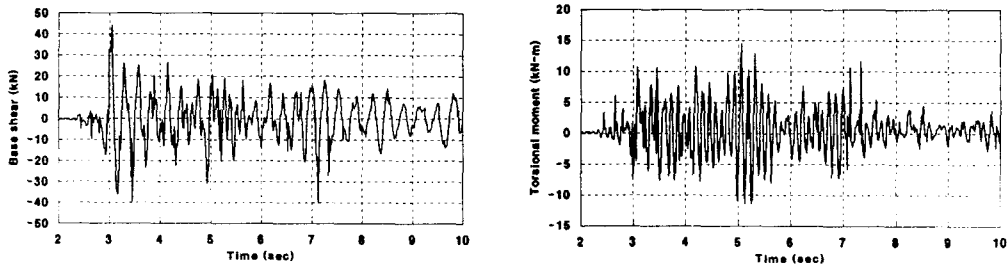
그림 6 밀면 전도모멘트와 기둥 축력에 의한 저항 전도모멘트 비교

그림 6에서 밀면 전도모멘트와 기둥 축력에 의한 저항 전도모멘트를 시간이력으로 비교하고 있다. 기둥 축력에 의한 저항 전도모멘트는 밀면 전도모멘트의 반력이므로 서로 반대부호이다. 그림 6(a)에서 밀면 전도모멘트와 모델 1의 4개 기둥에서 측정된 축력으로부터 구한 저항 전도모멘트를 비교하였다. 저항 전도모멘트가 (+)방향일 때, 밀면 전도모멘트는 저항 전도모멘트와 비슷한 양상을 보여주고 있으나, (-)방향일 때는 내부골조의 외부기둥 중 한 개의 기둥 축력만 고려되었기 때문에 저항 전도모멘트가 거의 나타나지 않았다. 그림 6(b)는 밀면 전도모멘트와 모델 2의 내부골조에서 측정된 축력만으로 구한 저항 전도모멘트를 비교한 결과를 보여주고 있다. 저항 전도모멘트가 (+)방향일 때, 저항 전도모멘트는 밀면 전도모멘트와 비슷한 거동을 보여주고 있으나, (-)방향일 때는 벽체의 축력이 고려되지 않아 저항 전도모멘트가 거의 나타나지 않았다. 모델 2의 경우 내부골조의 축력만 고려되었음에도 불구하고 저항 전도모멘트가 (+)방향일 때 밀면 전도모멘트와 저항 전도모멘트가 거의 비슷한 값을 보여주어 벽체를 포함하는 골조에서 대부분의 밀면 전도모멘트를 저항하고 있음을 알 수 있다. 그림 6(c)와 (d)는 각각 모델 3의 Taft030과 Taft080일 때 밀면 전도모멘트와 저항 전도모멘트를 비교하고 있다. 모델 3의 경우 벽체를 포함하는 외부골조에서 측정된 축력만으로 구한 저항 전도모멘트와 모든 골조에서 측정된 축력으로 구한 저항 전도모멘트를 같이 비교하였다. Taft030일 때는 밀면 전도모멘트와 모든 골조에서 측정된 축력으로 구한 저항 전도모멘트가 비슷한 값을 보여주었지만, Taft080일 때는 벽체를 포함하는 외부골조의 축력만으로 구한 저항 전도모멘트가 밀면 전도모멘트와 비슷한 값을 보여주고 있다. 이를 통해 모델 3의 경우 설계지진 시(Taft030) 강한골조와 약한골조가 동시에 밀면 전도모멘트에 저항하지만, 강한 지진인 Taft080일 때는 대부분의 밀면 전도모멘트를 강한골조에서 저항하는 것으로 나타났다.

### 3.4 비틀림 거동

구조물에 발생하는 비틀림 거동은 모델 3과 같이 구조물의 질량중심과 강성중심이 다르므로 인

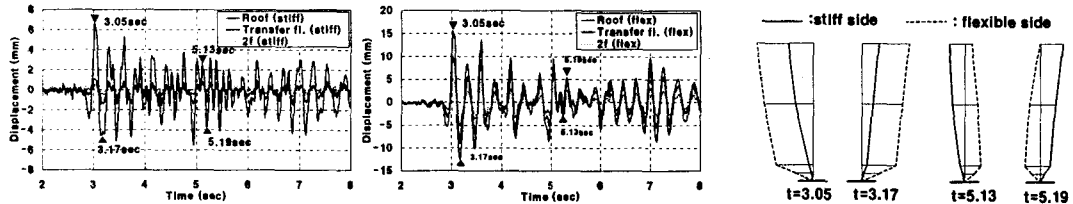
해 발생하는 비틀림과 구조물의 시공상오차, 재료성질의 차이 혹은 지반운동의 비틀림 성분으로 인해 발생하는 우발편심에 의한 비틀림이 있다. 비틀림 거동은 강한골조와 약한골조의 양측에서 측정된 변위로부터 구하는 층비틀림각과 각 골조에서 측정된 전단력으로부터 구한 비틀림모멘트로 나타낼 수 있다. 그림 7(a)는 Taft080일 때, 시간이력에 따른 모델 3의 밀면전단력을 보여주고 있고, 그림 7(b)는 비틀림모멘트를 보여주고 있다. Taft080일 때 밀면전단력은 3.05초와 3.17초에서 가장 큰 값을 보여주나, 비틀림모멘트는 밀면전단력이 크지 않은 5.06초에서 가장 큰 값을 보여주고 있다. 3초 초기부분과 8초 이후 부분에서는 위상이 거의 일치하였으나, 그 사이 부분에서는 전혀 다른 거동을 보여주어 비틀림 모멘트가 밀면전단력과 상관없이 작용하고 있음을 보여주고 있다. 그림 8(a)와 (b)는 Taft080에서 각각 모델 3의 강한골조와 약한골조의 지붕, 전이층, 2층의 층변위 이력을 보여주고 있다. 강한골조의 경우 모든 시간대에 지붕변위가 전이층변위보다 큰 1차모드의 거동을 하고 있다. 그러나, 약한골조는 3.05초와 3.17초일 일 때는 약한골조의 지붕변위가 전이층변위보다 큰 1차모드의 형상을 보여주고 있는 반면, 5.13초와 5.19초에서는 약한골조의 지붕변위가 전이층변위보다 작은 2차모드의 형상을 보여주었다. 이 시점에서 층변위를 그림 8(c)에서 보여주고 있는데, 3.05초와 3.17초일 때는 강한골조와 약한골조가 같은 방향으로 움직였으나, 5.13초와



(a) 밀면전단력

(b) 비틀림모멘트

그림 7 밀면전단력과 골조별 전단력으로부터 구한 비틀림 모멘트 (Model 3 : Taft080)

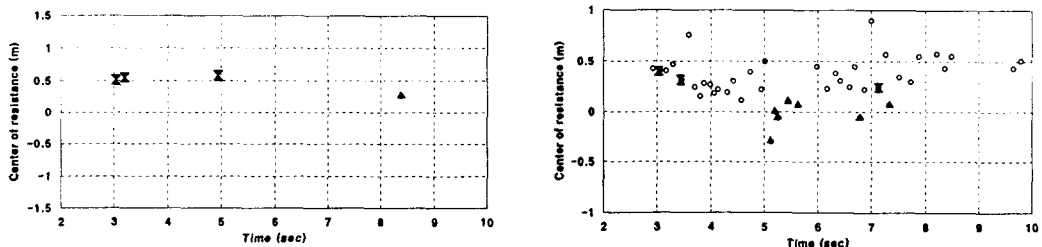


(a) 강한골조의 층변위 반응

(b) 약한골조의 층변위 반응

(c) 해당 시간에서 층변위

그림 8 비틀림에 의한 연약골조의 거동 (Model3 : Taft080)



(a) Model 2

(b) Model 3

그림 9 골조별 전단력으로부터 구한 저항중심 (Taft080)

5.19초일 때는 비틀림작용으로 인해 전이층부분이 서로 반대방향으로 움직였음을 볼 수 있다. 그림 9는 Taft080일 때, 모델 2와 모델 3에서 밀면전단력이 최대반응을 보일 때 저항중심을 구한 결과이다. 그림 9(a)의 모델 2의 경우, 저항중심이 구조물의 질량중심에 해당하는 0.5m와 일치하고 있으나, 그림 9(b)의 모델 3의 경우, 각 평면골조에 대한 탄성해석을 수행하여 구한 각 평면골조의 강성으로부터 저항중심을 구하면 그림 9(b)의 그래프에서는 0.11m에 위치한다. 그러나, 실험결과로부터 구한 저항중심은 매시간 큰 차이를 보여주고 있다. 강한골조와 약한골조가 1차모드의 거동을 보여주는 3초 부근과 8초 이후의 시간에서는 저항중심이 질량중심에 해당하는 0.5m에 근접한 반면 2차모드의 영향을 받는 시점에서는 저항중심이 질량중심으로부터 멀어지고 있음을 볼 수 있다.

### 3.5 흡수에너지량

지진거동 시 구조물에 발생하는 에너지량은 탄성에너지, 운동에너지, 흡수에너지로 구분할 수 있다. 측정된 가속도를 적분하여 구한 층속도로부터 병진운동에 의한 운동에너지, 전도모멘트에 의한 운동에너지, 비틀림에 의한 운동에너지를 각각 구하였으며, 각 골조에 작용하는 밀면전단력과 전이층변위로부터 전단변형에 의한 각 골조의 흡수에너지량을 구하고, 전도모멘트와 상부구조물의 회전각으로부터 전도모멘트에 의한 흡수에너지량을 각각 구하였다. 그림 10은 Taft080에서 모델 1, 모델 2, 모델 3의 시간이력에 따른 흡수에너지량을 각각 보여주고 있다. 하부 세개의 그래프는 전단변형에 의한 흡수에너지량을 보여주고 있고, 그 위는 전도모멘트에 의한 흡수에너지량을, 그 다음은 운동에너지량을 보여주고 있다. 전체 흡수에너지량을 보면 모델 1, 모델 2, 모델 3이 각각 1161kN-mm, 1454kN-mm, 1076kN-mm로 모델 2가 가장 큰 값을 보여주었다. 전체 흡수에너지량에 대한 전단변형에 의한 흡수에너지량은 모델 1, 모델 2, 모델 3이 각각 37%, 26%, 46%로 모델 3이 가장 크게 나타났으며, 모델 2는 전도모멘트에 의한 흡수에너지량이 상대적으로 크게 나타났다. 전단변형에 의한 흡수에너지량중 모델 2에서는 벽체를 포함하는 내부골조가 88%의 에너지를 흡수한 반면 모델 3에서는 벽체를 포함하는 외부골조가 48%의 에너지를 흡수하여 벽체가 중앙에 있는 모델 2와 다르다. 이를 통해 전체 구조물의 흡수에너지량 중 전도모멘트 변형에 의한 에너지 흡수가 가장 큼을 알 수 있다.

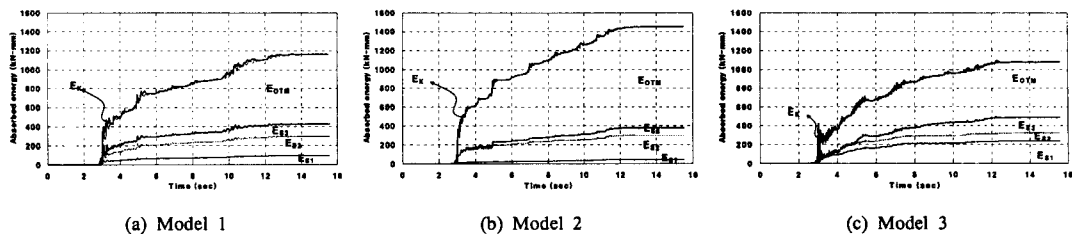


그림 10 에너지 흡수량 (Taft080)

## 4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 주상복합구조물의 고유주기는 현재 설계기준에서 제시하고 있는 식이 실제보다 클 수 있음

- 을 나타내고 있으며, 밀면전단계수도 설계밀면전단계수보다 2.7배 큰 값을 보여주었다.
- (2) 하부골조에 전단벽이 있음으로 인해 하부골조의 전단에 의한 변형을 감소시키는데 큰 효과가 있음을 보여주었으나, 전도모멘트에 의한 변형은 전단벽의 유무에 따라 큰 차이를 보여주지 않았다.
  - (3) 밀면 전도모멘트에 의한 하부골조의 저항은 벽체가 중앙골조에 있는 경우 벽체를 포함하는 중앙골조가 대부분의 밀면 전도모멘트에 저항하였으며, 벽체가 편심을 두고 배치된 경우 설계지진에서는 약한골조와 강한골조가 동시에 밀면 전도모멘트에 저항하였으나, 강한지진에서는 벽체를 포함하는 골조에서 밀면 전도모멘트에 저항하였다.
  - (4) 비틀림모멘트는 밀면전단력과는 상관없이 반응하였으며, 비틀림에 의한 2차모드의 영향으로 오히려 밀면전단력이 크지 않을 때 비틀림모멘트가 큰 값을 보여주었다. 따라서, 편심거리는 밀면전단력이 최대일 때 보다 비틀림모멘트가 클 때 큰 값을 보여주었다.
  - (5) 흡수에너지량의 측면에서 볼 때 벽체가 중앙에 있는 경우 전도모멘트 변형에 의한 흡수에너지량이 전체 흡수에너지량의 74%로 큰 비중을 차지했으며, 전단변형에 의한 에너지 흡수는 대부분 벽체를 포함하는 골조에서 가장 크게 발생하였다. 반면, 편심을 가진 구조물의 경우 전도모멘트 변형에 의한 흡수에너지량은 전체 흡수에너지량의 54%에 불과하였다.

#### 감사의 글

본 연구에서 실험은 1999년도 건설교통부 국책과제인 “복합구조(전단벽+골조)의 내진설계기법 연구”의 일부로 수행되었으며, 건설교통부와 참여업체인 쌍용건설(주), 대한주택공사, 코오롱건설(주), (주)형상구조안전의 지원에 의한 것이다. 진동대 실험은 한국기계연구원에서 수행되었고, 이 실험결과의 분석은 고려대학교의 연구년지원(2002.3-2003.2)과 한국과학재단과 일본학술진흥회의 방문연구(2002.8-2003.2)지원에 의해 가능하였다. 이들 지원에 대하여 감사드린다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부 (1997), “내진설계기준연구(II)-내진설계성능기준과 경제성평가,” 건설교통부
2. 대한건축학회 (2000), “건축물 하중기준 및 해설,” 대한건축학회
3. 이한선 외 (2001), “1/12축소 철근콘크리트 상부벽식-하부골조 건축물의 진동대 실험,” 한국지진 공학회 가을학술발표회 논문집, 제 5권 2호, pp.407-414
4. 이한선 외 (2001), “편심을 가진 1/12축소 RC주상복합구조물의 진동대 실험,” 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제 13권 2호, pp.185-190
5. Hiroshi Hosoya (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. 765-780
6. Lee et al. (2002), "Shaking Table Tests of a High RC Bearing-Wall Structure with Bottom Pilot Stories," *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 1 No. 1, pp. 47-54
6. P.Zia (1970), "Principles of Model Analysis," ACI sp-24, Michigan, pp19-39