

비내진 상세를 가진 3층 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동

Inelastic Behaviors of A 3-Story Reinforced Concrete Frame with Nonseismic Details

이 한 선* 우 성 우** 허 윤 섭***
Lee, Han-Seon Woo, Sung-Woo Heo, Yun-Sup

ABSTRACT

The objective of this research is to observe the actual response of low-rise nonseismic moment-resisting reinforced concrete frame subjected to varied levels of earthquake ground motions. First of all, the reduction scale for the model was determined as 1 : 5 considering the capacity of the shaking table to be used. This model was, then, subjected to the shaking table motions simulating Taft N21E component earthquake ground motions, whose peak ground accelerations(PGA's) were modified to 0.12g, 0.2g, 0.3g, and 0.4g. The global behavior and failure mode were observed. The lateral accelerations and displacements at each story and local deformations at the critical portions of structure were measured. The base shear was measured by using specially made load cells. Before and after each earthquake simulation test, free vibration tests were performed to find the changes in the natural period and damping ratio of the model.

1. 서론

국내 건축물의 많은 부분을 차지하는 중·저층 철근콘크리트(Reinforced Concrete : RC)조 건축물(상가, 사무실, 학교 등)은 내진설계 기준의 적용이 면제되어 있을 뿐만 아니라 내진성에 대한 기술적인 연구나 검증이 부진한 상태이다. 특히 대부분이 중·저층 철근콘크리트 골조로 되어 있는 병원, 소방서, 관공서, 학교 등의 공공시설물이 피해를 입을 경우 국가의 기능면에 커다란 장애를 초래할 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 경우에 대비하여 우리나라에 이미 건설된 중·저층 철근콘크리트 골조 건축물의 지진거동을 관찰하기 위해 우리나라의 대표적인 3층 철근콘크리트 골조를 선정하여 축소모델을 제작하고, 진동대를 이용하여 극심한 지진시 발생할 수 있는 지진파를 가함으로써 지진에 대한 비탄성 거동과 손상정도를 살펴보았다.

2. 1/5 축소 3층 R.C 골조의 진동대 실험내용

2.1 실험모델과 실험장치 및 계기

본 연구를 위하여 결정된 실험모델은 기둥의 하단부에 겹침이음이 있고, 띠철근의 간격이 넓으며 접합부에 띠철근이 사용되지 않았고 135° 내진후크를 사용하지 않아 전형적인 비내진 상세를 가지고 있다. 실험모델의 상세와 제작기법 및 재료특성은 참고문헌 (1)과 (2)에 상세히 설명되어 있다.

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 부교수 ** 정회원, 고려대학교 건축공학과 박사과정

*** 정회원, 고려대학교 건축공학과 석사과정

사용된 실험장치는 현대건설 기술연구소의 진동시스템이다. 실험에 사용된 계측기기는 표 1에 나타낸 바와 같이 변위측정기, 가속도계, 로드셀 등을 사용하여 각 층별 변위 및 가속도, 국부변형(소성힌지 부분의 회전각), 1층 기둥에서의 전단력을 측정하였다. 사용된 계측기기의 위치는 그림 1(a)에서 나타내었다. 상세한 진동대 실험과정은 참고문헌 (1)과 (3)에 설명되어 있다.

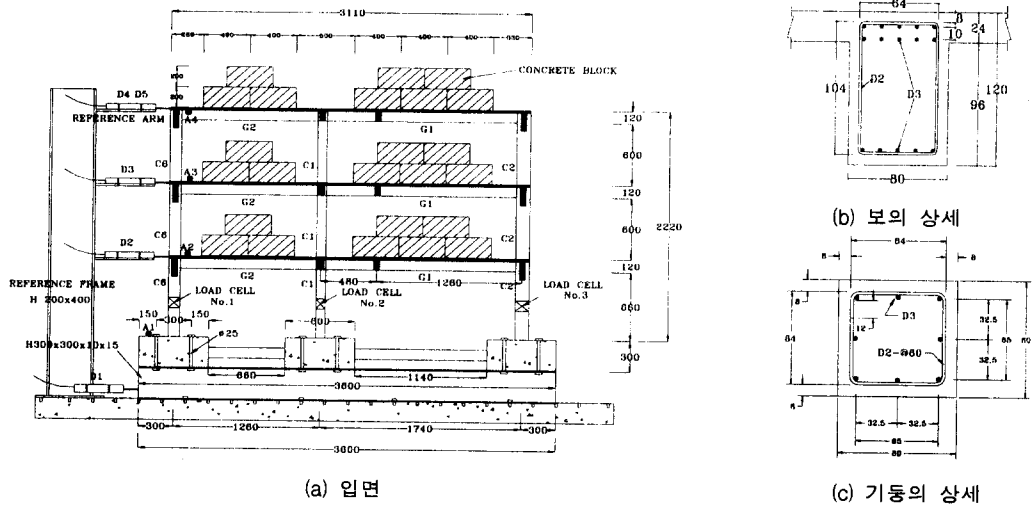


그림 1 실험모델 SETUP과 상세 (단위 : mm)

표 1 계측기기의 개수

| 위치 | 변위측정기(층별변위측정) | 가속도계 | 로드셀 | 변위측정기(국부변형측정) |
|----------------|---------------|----------|--------------|-------------------|
| 기초 | 1 ea(D1) | 1 ea(A1) | | |
| 2층 바닥 | 1 ea(D2) | 1 ea(A2) | 3 ea | 6 ea(보의 회전각 측정) |
| 3층 바닥 | 1 ea(D3) | 1 ea(A3) | (기둥의 전단력 측정) | 12 ea(기둥의 회전각 측정) |
| 옥상층 바닥 | 2 ea(D4, D5) | 1 ea(A4) | | |
| 계 | 5 ea | 4 ea | 3 ea | 18 ea |
| 총 채널 수 : 30 ea | | | | |

2.2 실험수행 프로그램

실험은 실험모델의 동적특성을 알아보기 위한 자유진동실험(Free vibration test)과 지진모의실험(Earthquake simulation test)으로 나누어 실시하였으며, 지진모의실험 전과 후에 자유진동실험을 수행하여 고유주기의 변화 및 감쇠비의 변화와 같은 구조물의 동적특성의 변화를 살펴보았다. 지진모의실험은 Taft N21E 입력지진파의 최고 가속도의 크기를 표 2에서 나타난 바와 같이 조정하여 수행하여 주요부위에서의 변형을 계측하고 거동과 파괴양상을 관찰하였다.

3 실험결과 및 분석

3.1 고유주기 및 감쇠비

자유진동실험 결과를 토대로 실험모델의 각 단계별 지진입력실험 전과 후의 고유주기 및 감쇠비를 구해서 표 3에 나타내었고 그 변화를 그림 2에 나타내었다. 실험모델의 고유주기는 입력지진가속도가 커질수록 점점 더 커지는 것을 알 수 있다. 각 단계별 감쇠비는 대수감소법(Logarithmic decrement method)에 의해서 구했으며 입력지진가속도의 크기가 커질수록 감쇠비가 점점 더 증가하는 것을 알

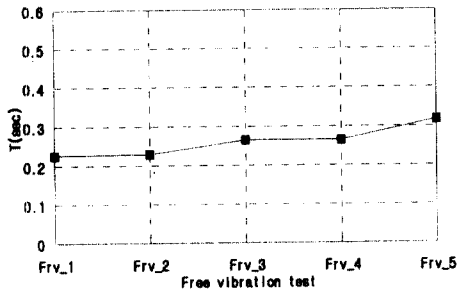
수 있다.

표 2 실험 프로그램

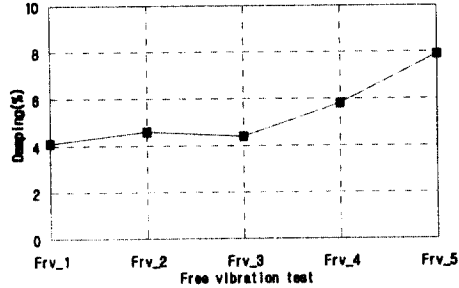
| 실험명 | 실험의 종류 | 내용 |
|---------|----------------------|------------------------------|
| FRV_1 | 자유진동실험 | 동적특성 계측 |
| TFT_012 | Taft N21E, PGA 0.12g | 우리나라 내진설계 기준 지진 |
| FRV_2 | 자유진동실험 | 동적특성 계측 |
| TFT_02 | Taft N21E, PGA 0.2g | 우리나라의 최대지진 (Max. earthquake) |
| FRV_3 | 자유진동실험 | 동적특성 계측 |
| TFT_03 | Taft N21E, PGA 0.3g | 우리나라에서 고려할 수 있는 최대지진 |
| FRV_4 | 자유진동실험 | 동적특성 계측 |
| TFT_04 | Taft N21E, PGA 0.4g | 강진, 비탄성 거동 파악 |
| FRV_5 | 자유진동실험 | 동적특성 계측 |

표3 고유주기 및 감쇠비

| 실험명 | 진동수(Hz) | 주기(Sec) | 감쇠비(%) |
|-------|---------|---------|--------|
| FRV_1 | 4.42 | 0.226 | 4.1 |
| FRV_2 | 4.37 | 0.229 | 4.6 |
| FRV_3 | 3.78 | 0.265 | 4.4 |
| FRV_4 | 3.78 | 0.265 | 5.8 |
| FRV_5 | 3.15 | 0.317 | 7.9 |



(a) 고유주기



(b) 감쇠비

그림 2 고유주기 및 감쇠비의 변화

3.2 최대 층 변위 및 층간 변위를

표 4에서는 각 단계별 입력지진가속도에서 3층에서의 변위가 최대로 일어날 때의 각 층 변위와 층간 변위율을 비교하여 나타내었다. 층간 변위율을 비교해 보면 최대 지진가속도 0.3g까지는 우리나라 내진규준 허용 최대값인 1.5%를 넘지 않으나 최대 지진가속도 0.4g에서 허용 최대값을 넘어서 나타나고 있고 우리나라 현행 내진설계 기준에 설정된 설계 지진인 최대 지진가속도 0.12g에서는 탄성범위내의 최대 허용값인 0.33%를 넘지 않고 탄성적으로 거동함을 그림 7(a)에서 알 수 있다. 각 단계별 입력지진가속도에 대한 층간 변위율의 변화는 그림 3에 나타내었다. 그림 5에서는 최대 지진가속도 0.4g에서의 각 층의 층 변위 시간이력을 나타내었다.

3.3 최대 층 가속도의 비교

표 5에서는 각 단계별 입력지진가속도에서 3층에서의 가속도가 최대로 일어날 때의 각 층 가속도를 나타내었다. 최대 입력지진가속도에 대한 실험모델의 최상층 최대 응답가속도의 동적확대비는 약 2배~2.5배 정도로 PGA 0.2g이후부터는 점차 감소함을 알 수 있다. 그림 6에서는 최대 지진가속도 0.4g에서의 층별 층 가속도를 나타내었다.

표 4 최대 층 변위 및 층간 변위(3층에서의 변위가 최대로 일어날 때)

| 실험명 | 진동대 최대 가속도(g) | 층 | 최대 층 변위(mm) | 최대 층간 변위(%) |
|---------|---------------|---|-------------|-------------|
| TFT_012 | 0.138 | 1 | 2.02 | 0.26 |
| | | 2 | 3.69 | 0.23 |
| | | 3 | 4.5 | 0.11 |
| TFT_02 | 0.21 | 1 | 6.06 | 0.77 |
| | | 2 | 11.36 | 0.74 |
| | | 3 | 14.06 | 0.38 |
| TFT_03 | 0.31 | 1 | 7.25 | 0.93 |
| | | 2 | 14.99 | 1.08 |
| | | 3 | 17.87 | 0.4 |
| TFT_04 | 0.4 | 1 | 12.28 | 1.57 |
| | | 2 | 24.40 | 1.68 |
| | | 3 | 29.88 | 0.76 |

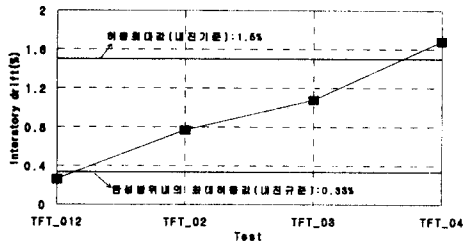


그림 3 입력지진가속도의 변화에 따른 층간변위의 변화

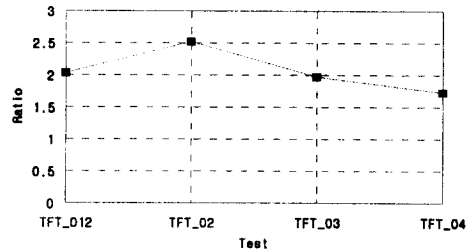


그림 4 동적확대비의 변화

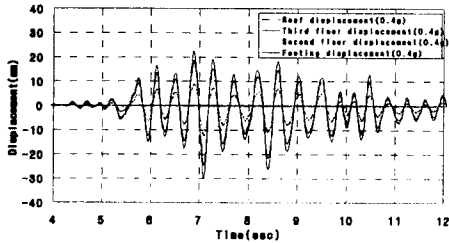


그림 5 층 변위의 시간이력(0.4g)

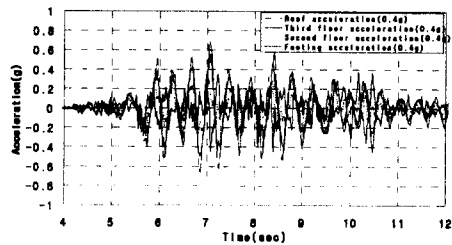


그림 6 층 가속도의 시간이력(PGA 0.4g)

표 5 최대 층 가속도의 산정(3층에서의 가속도가 최대로 일어날 때)

| 실험명 | 진동대 최대 가속도(g) | 층 | 최대 층 가속도(g) | 동적 확대비 |
|---------|---------------|---|-------------|--------|
| TFT_012 | 0.138 | 1 | 0.13 | 2.03 |
| | | 2 | 0.23 | |
| | | 3 | 0.28 | |
| TFT_02 | 0.21 | 1 | 0.22 | 2.52 |
| | | 2 | 0.37 | |
| | | 3 | 0.53 | |
| TFT_03 | 0.31 | 1 | 0.13 | 1.97 |
| | | 2 | 0.49 | |
| | | 3 | 0.61 | |
| TFT_04 | 0.4 | 1 | 0.22 | 1.73 |
| | | 2 | 0.51 | |
| | | 3 | 0.69 | |

3.4 밀면 전단력과 1층 층간 변위

그림 7은 각 단계별 밀면 전단력과 1층 층간 변위와의 관계를 비교해서 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서

보통이 우리나라 현행 내진 설계 기준에서 예상하는 설계지진(0.12g)의 가속도에 대해서는 선형 탄성으로 거동하고 있는 것을 알 수 있으며 최대 밀면 전단력은 1.8t으로 나타나 만약 이 건축물이 내진설계되었다면 적용되었을 설계 밀면 전단력 0.38t의 약 4.7배 정도를 나타내고 있다. 최대 지진가속도 0.2g, 0.3g, 0.4g에 대해서는 최대 밀면 전단력이 각각 3.14t, 3.58t, 3.79t으로 나타났으며 그림 7(b)로부터 3.79t의 밀면 전단력에서 현저한 항복현상이 관찰되었다. 이 구조물이 보유하고 있는 최대 밀면 전단력은 3.79t으로서 우리나라 설계 지진(0.12g)에 대해 나타난 최대 밀면 전단력(1.8t)의 약 2.1배 정도를 나타내고 있다.

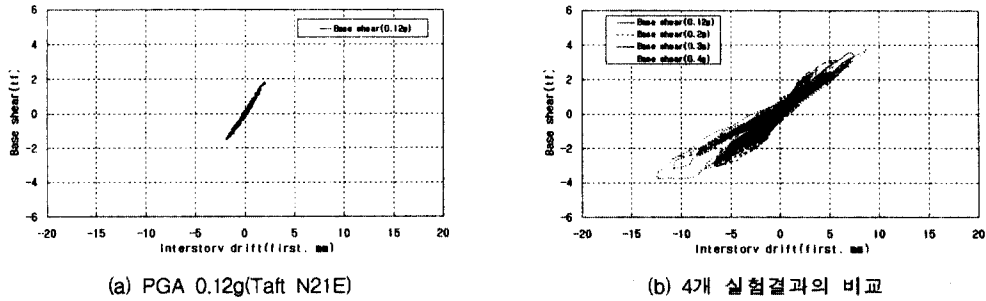


그림 7 밀면 전단력과 1층 층간 변위 이력

3.5 유효무게에 대한 밀면 전단력의 비(V/W)의 비교

우리나라 내진 설계 기준에서의 유효무게에 대한 밀면 전단력의 비(V/W)를 살펴보면 다음과 같다.

$$V/W = \frac{AISC}{R} = \frac{(0.12)(1.0)(1.39)}{4.5} = 0.037$$

$$(T = 0.23 \times \sqrt{5} = 0.514, C = \frac{1}{1.2\sqrt{T}} = 1.162 \leq 1.5, S = 1.2 \quad SC = 1.39 \leq 1.75 \quad \therefore SC = 1.39)$$

여기서 V : 밀면 전단력, W : 유효무게, A : 지역계수, I : 중요도계수, S : 지반계수
C : 동적계수, T : 고유주기, R : 반응수정계수

표 6에서는 각 단계별 입력지진가속도에서 나타난 유효무게에 대한 밀면 전단력의 비를 나타내었으며 우리나라 내진 설계 기준에서의 설계지진계수 0.037과 비교해 보면 훨씬 큰 값을 나타내었다.

표 6 유효무게에 대한 밀면 전단력 비

| 최대 지진가속도 | V/W |
|----------|-------------------|
| 0.12g | 1.8/10.3 = 0.174 |
| 0.2g | 3.14/10.3 = 0.305 |
| 0.3g | 3.58/10.3 = 0.348 |
| 0.4g | 3.79/10.3 = 0.368 |

3.6 회전각의 분포

그림 8에서는 최대 지진가속도 0.4g에서 측정된 각 부위별 회전각의 크기 분포를 비교하였다. 2층 내부기둥의 하부에서 가장 큰 값이 측정되었다. 이 골조의 경우 내부기둥이 외부기둥에 비해 상대적으로 크기가 작고 이에 따라 강도 및 강성이 작으므로 인해 큰 소성 회전각이 발생한 것으로 보인다.

3.7 파괴양상

그림 9에서는 실험모델의 파괴양상을 나타내었다. 최대 지진가속도 0.12g와 0.2g에서는 눈으로 관찰할 수 있는 균열이 거의 발생하지 않았고 최대 지진가속도 0.3g에서는 2층 바닥의 우측보(1)에서 균열이

발생하였다. 최대 지진가속도 0.4g에서는 2층 바닥의 우측보 단부(2,3)와 2층 바닥의 좌측보 단부(4,5) 그리고 1층 좌측 외부기둥의 상단부(6)에서 휨균열이 발생하였으며 1층 좌측 외부기둥의 하단부(7)와 1층 우측기둥의 하단부(8)에서는 전단균열이 발생하였다.

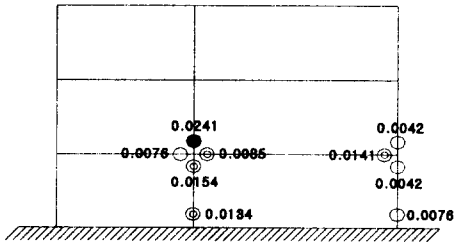


그림 8 최대 단부 회전각 (단위 : rad)

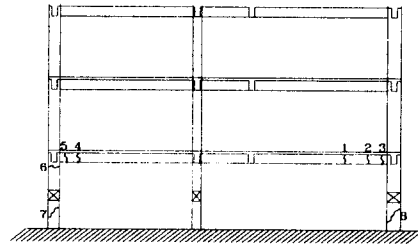


그림 9 파괴양상

4. 결론

이상의 실험결과와 분석에 의한 결론은 다음과 같다.

- (1) 자유진동실험 결과 실험모델의 거동이 거의 1차모드에 의해 지배되는 것을 볼 수 있으며 지진입력 실험전 초기의 실험모델의 1차모드 고유주기는 0.226초(실물크기 : 0.51초)로 나타났고 1차모드의 감쇠비는 4.1%정도로 나타났다.
- (2) 우리나라 현행 내진 설계 기준에서 설계 지진 즉, 0.12g의 최대 지진가속도에 대해서는 선형탄성으로 거동하며 전혀 손상이 없었고 층간 변위는 0.26%이내로 나타나 허용범위인 1.5%보다 훨씬 작았다. 최대 진동대 가속도(0.138g)에 대한 실험모델의 최상층 최대 응답가속도(0.28g)의 동적확대비는 2.03정도로 나타났다. 최대 밀면 전단력(1.8t)은 설계 밀면 전단력(0.38t)의 약 4.7배 정도로 나타났다.
- (3) 최대 지진가속도 0.2g, 0.3g, 0.4g에 대해서 최대 층간 변위는 각각 0.77%, 1.08%, 1.68%로, 최대 밀면 전단력은 각각 3.14t, 3.58t, 3.79t으로 나타났고 최대 밀면 전단력 3.79t에서 항복현상을 보여 주었다. 이 구조물이 보유하고 있는 최대 밀면 전단력(3.79t)은 우리나라 예상 최대 지진(0.12g)에 대해 나타난 밀면 전단력(1.8t)의 약 2.1배 정도로 나타났고, 층간변위는 0.4g에서 상당히 큰 양을 보여줌으로써 비구조재에 큰 손상을 줄 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 파괴모드는 대체로 휨 파괴모드이나 0.4g 최대 지진가속도 실험에서 1층 기둥의 갑작스런 전단파괴 양상을 나타내었다. 그러나 전반적인 손상크기는 눈으로 보기에 심각한 상태가 아니었다.

감사의 글

이 연구는 1996년도 건설교통부 국책과제인 “우리나라 중·저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해예측 및 보수보강법 연구”의 일부로 수행되었으며 건설교통부와 참여업체인 (주)쌍용건설, (주)동부건설, (주)현대건설 및 (주)동양구조안전기술의 지원에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 김상대, 이한선, 김영문, 조순보, 우운택외 25명, “우리나라 중·저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해예측 및 보수보강법 연구”, 건설교통부 '96 연구개발사업 최종 연차 보고서, pp804, 1997. 12.
2. 이한선, 우성우외 3명, “1/5 축소 3층 철근콘크리트 골조 모델의 제작기법 및 재료특성 연구”, 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집 제9권 2호, pp 575~580, 1997. 11.
3. 이한선, 우성우외 6명, “1/5 축소 비연성 3층 철근콘크리트 골조의 진동대 실험”, 1997. 11, 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집 제9권 2호, pp 581~586, 1997. 11.