

1 : 5 축소 3층 철근콘크리트 골조의 횡방향 가력실험

Pushover Tests of 1 : 5 Scale 3-Story Reinforced Concrete Frames

이 한 선* 우 성 우** 허 윤 섭** 송 진 규***
Lee, Han-Seon Woo, Sung-Woo Heo, Yun-Sup Song, Jin-Kyu

ABSTRACT

The objective of the research stated herein is to observe the elastic and inelastic behaviors and ultimate capacity of 1:5 scale 3-story reinforced concrete frame. Pushover tests were performed to 1:5 scale 3-story reinforced concrete frames without and with infilled masonry. To simulate the earthquake effect, the lateral force distribution was maintained to be an inverted triangle by using the whiffle tree.

From the results of tests, the relations between the total lateral load and the roof drift, the distribution of column shears, the relation between story shear and story drift, and the angular rotations at the critical portions of structures were obtained. The effects of infilled masonry are investigated with regards to the stiffness, strength, and ductility of structures. Final collapse modes of structures with and without infilled masonry are compared.

1. 서론

국내건축물의 많은 부분을 차지하는 중·저층 철근콘크리트 구조물의 대부분은 내진설계 기준의 적용이 면제되어 있고 내진성에 대한 공학적인 연구나 검증이 부진한 상태이다. 또, 이러한 구조물에 건축적인 이유로 조적채움벽이 사용되고 있으나 실제 지진이 왔을 경우 조적벽의 구조물에 대한 기여도나 이런 건물들의 내진성능 및 지진에 대한 안정성에 관한 연구가 빈약한 실정이다. 본 연구는 우리나라에서 경찰서 건물로 사용되고 있는 중력하중 설계된 1/5 축소 3층 철근콘크리트 골조를 변위 조절에 의해 횡방향 가력 실험을 수행하여 조적 채움벽의 유무에 따른 골조의 선형 탄성 및 비선형 소성영역에서의 거동을 실험을 통해 관찰 비교함으로써 채움벽의 영향을 분석해 보았다. 이 모델의 제작 방법은 참고문헌(1)과 (2)를 참조하기 바란다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구를 위하여 결정된 실험모델은 기둥의 하단부에 접침이음이 있고, 띠철근의 간격이 넓으며 접합부에 띠철근이 사용되지 않고 135° 내진후크를 사용하지 않아 전형적인 비내진 상세를 가지고 있다.

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 부교수 ** 정회원, 고려대학교 건축공학과 박사과정
*** 정회원, 현대건설 기술연구소 과장

실험계측기기는 표 1에 나타난 바와 같이 각 층별로 변위측정기를 사용하였으며, 1층의 각 기둥 중앙부에 로드셀을 설치하여 기둥별 층 전단력을 측정하였고, 국부변형(소성흔지 부분의 회전각)을 측정하기 위해 22개의 변위측정기를 사용하였다.

실험장치 설치 상황은 그림 1과 같다. 각 층 변위를 측정하기 위하여 기준프레임에 변위측정기를 부착하였다. 옥상층 변위의 경우 Frame A(D4)와 Frame B(D5)의 2개의 골조에서 변위를 측정하여 평균치를 사용하였으며, 2개의 별도 데이터 취득장치를 사용하였기 때문에 다른 데이터 취득장치에 연결되어 취득된 D5와 D6의 변위를 비교함으로써 얻어진 이들 데이터의 시간기록을 일치시킬 수 있었다. 그림 2에서는 Frame A와 Frame B에서의 옥상층 변위를 비교하여 나타내었는데 변위에 있어서 큰 차이가 발견되지 않고 있으며, 이후 Frame A의 계측 결과가 구조물 전체의 거동을 대표하는 것으로 가정하여 자료를 분석하고자 한다. 층 변위 D2, D3의 경우는 양 frame의 중앙에서 계측한 것이다. 실험체의 가력을 위해서는 각 층의 지진력 분포를 역삼각형으로 일정하게 유지하기 위해서 휘플트리를 구성하였다. 각 단순보의 지점에 모멘트가 작용하지 않도록 하기 위해서 휘플트리 연결부를 20mm 강봉을 사용하여 힌지로 하였다. 휘플트리 자중에 의한 처짐을 방지하고 수평을 유지할 수 휘플트리 상부에 고정 프레임을 설치하여 로울러를 구성하였다.

실험은 옥상층의 변위 제어에 의해 조적벽이 없는 실험체(Bare frame: BF)와 조적벽이 있는 실험체(Infilled frame: IF)의 두 가지 실험체에 대해 수행하였으며 각 층별 횡하중의 분포는 그림 2와 같다.

표 1 계측기기의 개수

| 위치 | 층별변위 측정 | 로드셀 | 국부변형 측정 |
|----------------|------------------|-----------|-------------------|
| 기초 | 1 ea(D1) | | |
| 2층 바닥 | 1 ea(D2) | 3 ea | 14 ea(보의 회전각 측정) |
| 3층 바닥 | 1 ea(D3) | (기둥의 전단력) | 10 ea(기둥의 회전각 측정) |
| 옥상층 바닥 | 3 ea(D4, D5, D6) | | |
| 계 | 6 ea | 3 ea | 24 ea |
| 총 채널 수 : 33 ea | | | |

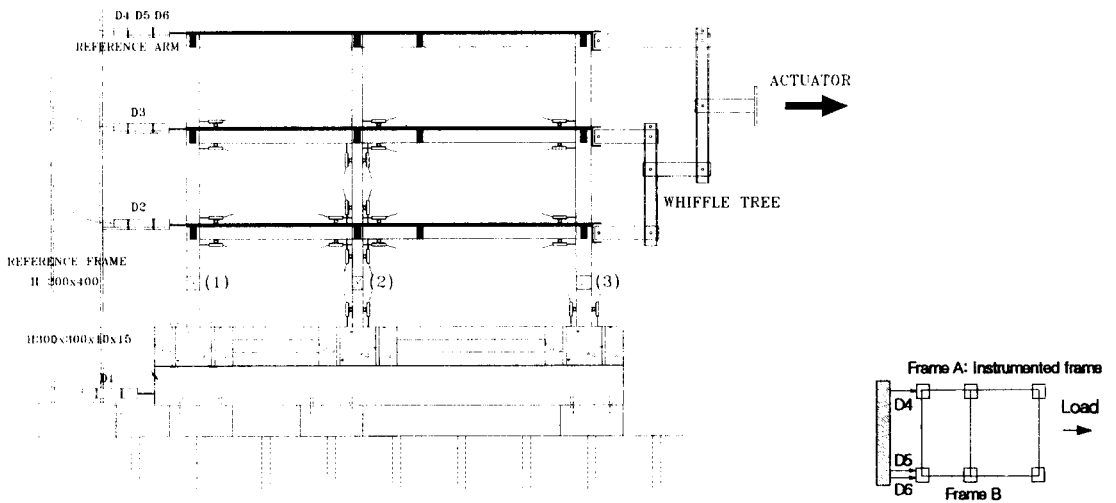
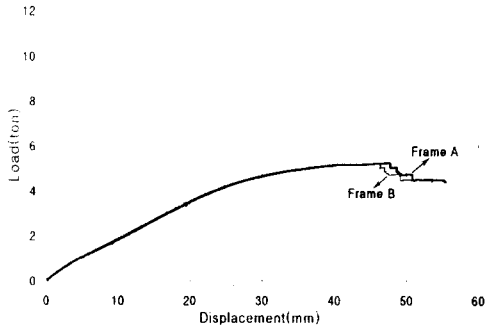
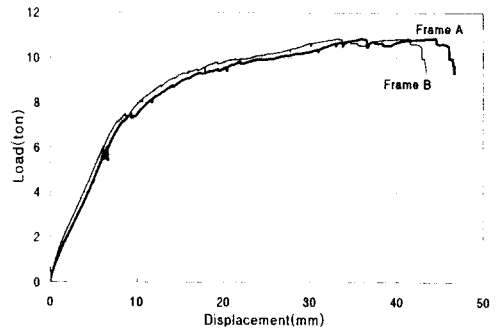


그림 1 실험장치의 설업(단위: mm)



(a) Bare frame



(b) Infilled frame

그림 2 옥상층 바닥에서의 변위 비교

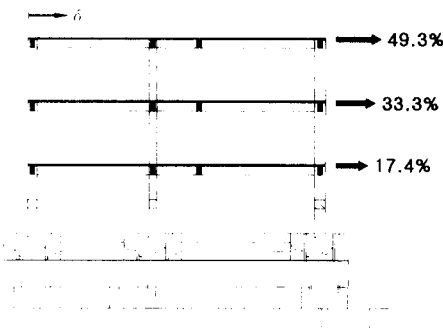


그림 3 층별 횡하중의 분포

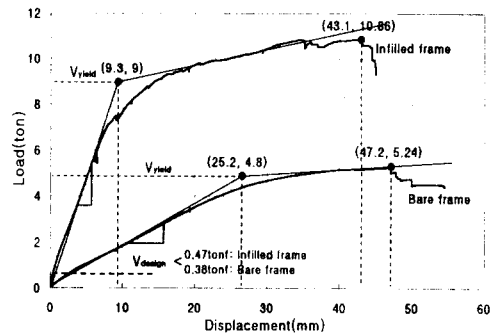


그림 4 횡하중과 지붕처짐

3. 실험결과 및 분석

3.1 횡하중과 지붕처짐

BF의 경우 그림 4에서 보는 바와 같이 뚜렷한 항복현상을 보여주고 있으나 연성은 크지 않아 비내진 상세를 가진 구조물의 비탄성 거동을 잘 나타내고 있음을 발견할 수 있다. BF는 구조물의 붕괴하중이 5.25tonf로 나타나고 초기 강성은 0.19t/mm로 나타나고 있으며, 항복 변위는 약 25.2mm로 나타나 횡 변위 능력이 47.2mm인 것을 감안할 때 구조물 전체의 변위 연성비(displacement ductility ratio)는 약 1.87정도를 나타내고 있다. IF는 붕괴하중이 10.86tonf이고 초기 강성은 0.97t/mm로 나타나고 있다. 항 복 변위는 약 9.3mm으로서 횡변위 능력이 43.1mm이므로 구조물 전체의 변위 연성비는 약 4.63 정 도를 나타내고 있다. BF와 비교할 때 횡변위 능력은 떨어지지만 강도, 강성 및 변위 연성비는 증가한 것으로 나타났다.(표 2)

표 2 조적벽의 유무에 따른 비교

| | Bare frame(1) | Infilled frame(2) | (2)/(1) |
|------------------------------|---------------|-------------------|---------|
| Strength | 5.24t | 10.86t | 2.1 |
| Stiffness | 0.19t/mm | 0.97t/mm | 5.1 |
| Yield drift | 25.2mm(1.15%) | 9.3mm(0.42%) | |
| Drift capacity | 47.2mm(2.13%) | 43.1mm(1.94%) | |
| Displacement ductility ratio | 1.87 | 4.63 | 2.5 |

()안의 수치는 drift ratio(% of story height)

3.2 밀면 전단력

그림 4에서 나타난 바와 같이 BF의 경우 구조물의 항복 밀면 전단력은 약 4.8tonf로 구조물의 설계 밀면 전단력(0.38tonf)의 약 12.6배 정도로 나타났고 최대 밀면 전단력은 약 5.24tonf로 설계 및 항복 밀면 전단력에 대해 각각 13.8배와 1.1배를 나타내었다. 또, IF의 경우 항복 밀면 전단력은 약 9tonf로 구조물의 설계 밀면 전단력(0.47tonf)의 약 19.1배 정도로 나타났으며 최대 실험 밀면 전단력은 약 10.86tonf로 설계 및 항복 밀면 전단력에 대해 각각 23.1배와 1.2배를 나타내었다.

3.3 기둥 전단력과 횡하중의 비교

그림 5에서는 로드셀에서 측정된 기둥 전단력의 합과 횡하중을 비교하여 나타내고 있다. 그림 5(a)에서 보듯이 BF는 로드셀의 측정값이 횡하중과 거의 일치하는 것으로 나타나 로드셀의 정확성을 입증하였고 그림 5(b)의 IF는 로드셀의 측정값이 횡하중의 20%정도로 나타나 조적벽이 80% 정도의 큰 전단력을 부담하고 있고 구조물의 전체 강성 증가에 크게 기여하는 사실을 발견할 수 있다. IF의 경우 기둥(1)의 전단력 기여는 거의 무시할 만큼 작음을 또한 알 수 있다. 2mm까지의 1층 횡변위에 대해서는 조적벽이 선형 탄성거동을 보이거나 이후 10mm까지 조적벽에서의 비선형 거동이 전체 층 전단력-층 변위의 비선형성을 지배하는 것을 관찰할 수 있다.

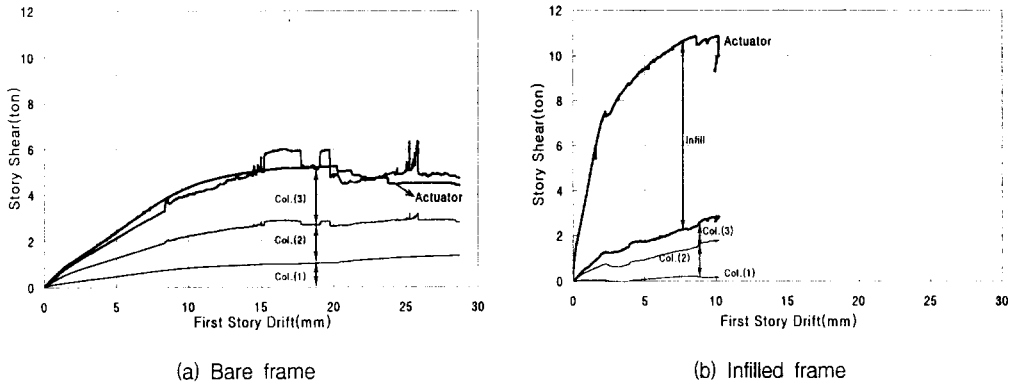


그림 5 1층에서의 층 전단력에 대한 기둥 전단력의 기여

3.4 층간 변위와 층 전단력의 비교

그림 6에서는 층간 변위과 층 전단력을 비교하여 나타내었다. BF의 경우 1층에서의 최대 층간 변위가 28.7mm(3.7%)로 가장 크게 나타났으며 2층에서는 19mm(2.6%)로 나타났고, 강도저하 후 많은 변형이 1층에 집중됨에 따라 1층에서 파괴 메카니즘이 형성되었음을 알 수 있다. IF의 경우 다른 층에 비해 2층에서 집중적으로 상당히 큰 층간 변위가 일어나며 최대 층간 변위는 33.2mm(4.6%)로 나타났고 뚜렷한 항복현상을 보여주고 있어 이 층에서의 약층 파괴를 짐작할 수 있다. 표 3에서는 BF와 IF의 1, 2층에서의 최대 층간 변위와 최대 층 전단력, 강성을 나타내고 있다.

표 3 최대 층간 변위와 최대 층 전단력, 층 강성의 비교

| | | Bare frame(1) | Infilled frame(2) | (2)/(1) |
|---------------------------|--------|---------------|-------------------|---------|
| Max. story drift (mm) | First | 28.7(3.7%) | 10.2(1.3%) | 0.36 |
| | Second | 19(2.6%) | 33.2(4.6%) | 1.75 |
| Max. story shear (tonf) | First | 5.24 | 10.86 | 2.07 |
| | Second | 4.33 | 8.97 | 2.07 |
| Story stiffness (tonf/mm) | First | 0.51 | 4 | 7.84 |
| | Second | 0.36 | 1.6 | 4.44 |

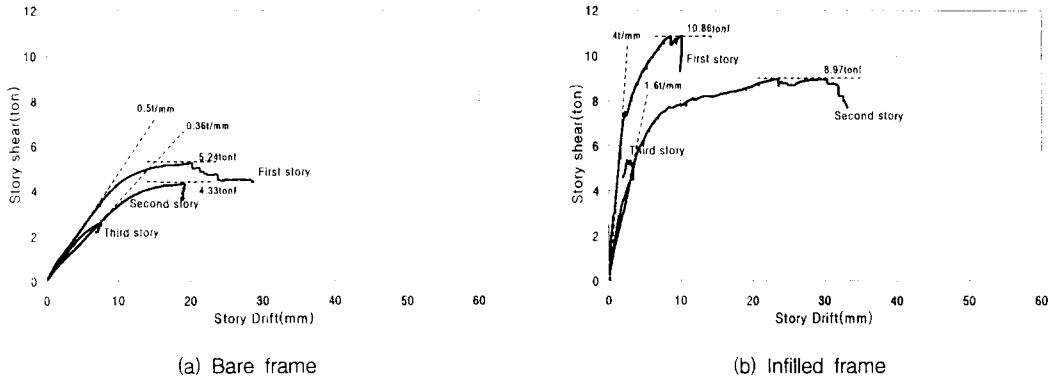


그림 6 층간변위와 층전단력

3.5 국부변형

그림 7에서는 붕괴시의 기둥과 보에서의 최대 회전각의 크기를 나타내고 있다. BF의 경우 기둥에서의 회전각은 대략 0.04rad 범위내에 있고 긴 경간의 1층 외부기둥에서 가장 큰 값을 나타내었다. 그러나 실제 파괴양상은 내부기둥의 1층 상단에서 휨거동에 의한 콘크리트의 압축파괴로 실험을 중단하게 되었다. 보에서는 2층 바닥의 긴 경간 외부 접합부에서 0.026rad의 가장 큰 값을 나타내었다. IF의 경우는 좀 다른 양상을 나타내었는데 기둥에서의 회전각이 대부분 약 0.02rad의 범위내에 있었으나 2층 벽체가 2개로 양분되면서 이에 따라 내부기둥도 양분된 조적벽의 이동으로 2개의 단주로 바뀌면서 중앙과 하단부에 소성힌지를 구성하였고 이에 따라 2층 하단부 내부기둥에서 아주 큰 회전각(0.081rad)을 나타내었다. 또, 1층 내부기둥 하부와 긴 경간 쪽의 1층 외부기둥 하부에서도 어느 정도 큰 회전각을 나타내고 있다. 보의 경우는 기둥에 비해 상대적으로 큰 양의 회전각이 발생하였음을 알 수 있었고 2층 바닥 긴 경간쪽 보의 우측 단부에서 가장 큰 값을 나타냈으며 3층 바닥 긴 경간쪽 보의 좌측 단부도 큰 회전각을 나타내고 있다.

그림 8에서는 1층 내부 접합부와 긴 경간쪽의 외부 접합부에서 측정된 회전각을 나타낸 것이다. BF의 경우 같은 하중에서 보[(3), (4)]보다 기둥[(1), (2)]에서 약 2배 정도 더 큰 회전각을 나타내고 있다. 이와 대조적으로 IF의 경우 (1), (3), (4)는 대체로 (2), (5)에 비해 1/2이하 수준으로 증가하다가 항복이후 (1), (3), (4)는 거의 일정한 수준인 반면 (5)와 (2)는 급격히 증가하다가 결국 2층 내부기둥 하부에서의 소성힌지의 변형능력 도달과 2층 기둥 상단(×표시)에서의 전단파괴로 최대값에 도달하였으며 이로서 실험을 중단하였다.

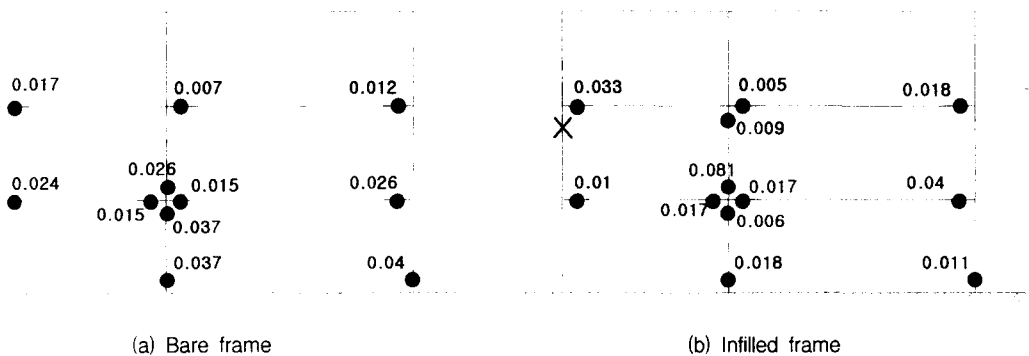
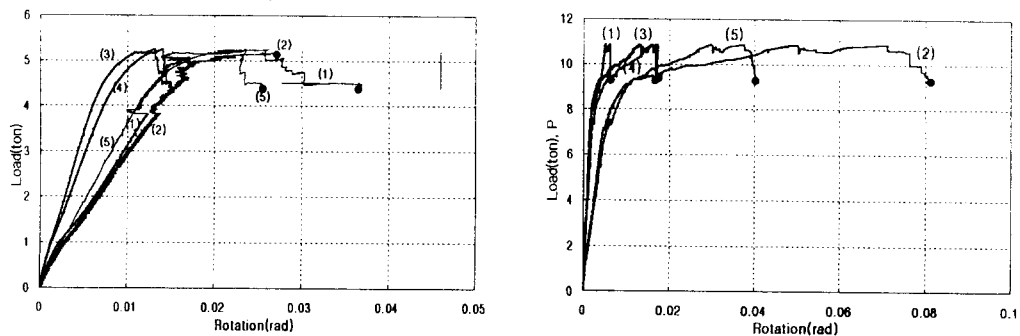


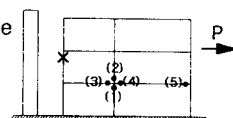
그림 7 최대 회전각의 크기



(a) Bare frame

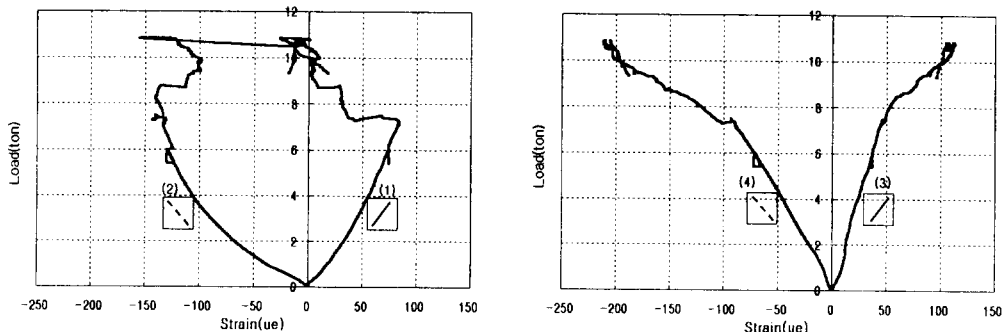
(b) Infilled frame

그림 8 내·외부 집합부에서의 회전각



3.6 조적채움벽에서의 변형률

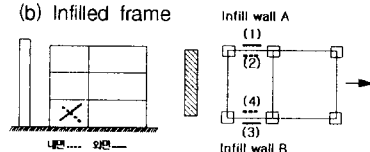
그림 9에서는 조적벽이 있는 실험체에 대하여 스트레인 게이지로 1층 조적벽에서의 변형률을 측정하여 나타내었다. 조적벽 A의 경우 7 tonf 정도의 하중에서 줄눈에서의 횡 균열로 인해 하중저항능력이 급격히 떨어진 것으로 보이며 조적벽 B의 경우 끝까지 압축과 인장으로 횡하중에 저항한 것으로 판단된다. 최대 변형률은 압축에서 210×10^{-6} , 인장에서 110×10^{-6} 으로 나타나고 있다.



(a) Bare frame

(b) Infilled frame

그림 9 조적벽에서의 변형률



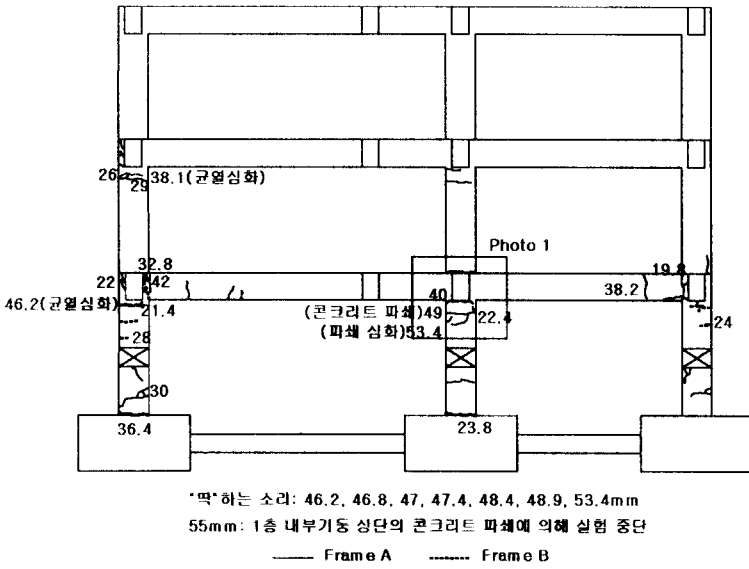
3.7 파괴모드

그림 10에서는 균열의 발전과정과 파괴모드를 나타내고 있다. 최종적인 구조물의 파괴는 BF의 경우 1층 내부기둥 상단부에서 콘크리트의 파쇄 현상(Photo 1)에 의해 이루어졌으며 IF의 경우 2층 조적벽의 균열이 심화되어 벽체가 크게 미끄러지고 벽체의 양쪽을 지지하고 있던 외부기둥에서의 큰 전단파괴 및 내부기둥의 단주화에 따른 큰 회전각에 의한 약층파괴의 양상(Photo 2)을 나타내었다.

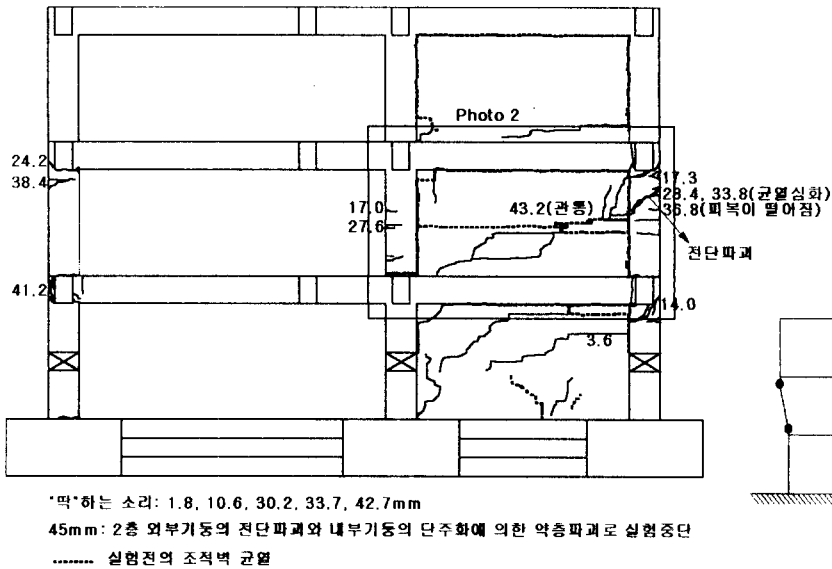
4. 결론

이상의 실험결과 분석에 의한 결론은 다음과 같다.

(1) 실험모델의 거동은 뚜렷한 항복현상을 보여주나 연성이 크지 않아 비내진 상세를 가진 구조물의 비탄성 거동을 잘 나타내고 있다.



(a) Bare frame



(b) Infilled frame(Frame A)

※ 그림안의 숫자는 균열 발견시의 옥상층 변위를 나타낸 것임.

그림 10 균열의 발전과정 및 파괴모드

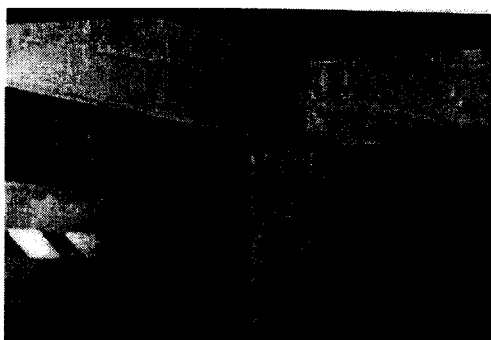


Photo 1

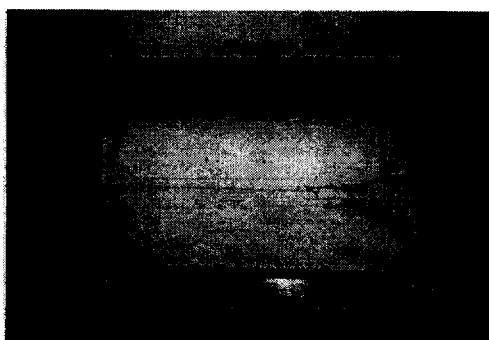


Photo 2

(2) 조적벽이 없는 실험체(Bare frame)와 조적벽이 있는 실험체(Infilled frame)를 비교해 보면 조적벽이 있을 때 구조물의 강도와 강성이 크게 증가하고 횡변위 능력은 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 변위 연성비(displacement ductility ratio)는 조적벽이 있는 경우가 오히려 2.2배 정도 크게 나타났고 최대 층간 변위와 최대 밀면 전단력도 크게 나타났다.

(3) 조적벽이 없을 경우 로드셀에 의해 측정된 기둥 전단력의 합과 횡하중이 거의 일치하는 것으로 나타났으나 조적벽이 있는 경우 기둥 전단력의 합이 횡하중의 20% 정도로 나타나 조적벽이 80% 정도의 상당히 큰 전단력을 부담하고 있어 구조물의 전체 강성 증가에 크게 기여하였다.

(4) 최종적인 구조물의 파괴 메카니즘은 조적벽이 없는 실험체의 경우 1층 내부기둥 상단부에서 휨거동에 의한 콘크리트의 파쇄 현상에 의해 이루어졌으며 조적벽이 있는 실험체의 경우 2층 조적벽의 균열이 심화되어 벽체가 2개로 양분되면서 벽체의 양쪽을 지지하고 있던 외부기둥에서의 큰 전단파괴 및 내부기둥의 단주화에 따른 약층파괴의 양상을 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 1997년도 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. 특히 이 실험에 직접 참여한 고려대학교 건축공학과 박사과정 고동우, 석사과정 강귀용, 김정우 씨와 (주)현대건설의 정하선 이사님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상대, 이한선, 김영문, 조순보, 우은택외 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 1명, “비내진 상세를 가진 3층 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동”, 한국콘크리트 학회 봄 학술발표회 논문집 제10권 1호, pp 427~432, 1998. 5.
4. 이한선, 우성우, “조적체움벽이 있는 1/5 축소 3층 비연성 철근콘크리트 골조의 진동대 실험”, 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집 제 10권 2호, pp 541~546, 1998. 11
5. 이한선, 우성우, “중력하중 설계된 1:5 축소 3층 철근콘크리트 골조의 지진모의실험”, 한국콘크리트 학회 논문집 제 10권 6호, pp241~252, 1998. 12