

조적채움 RC 골조의 비선형 거동에 대한 해석 모델

Analytical Modeling for Nonlinear Behaviors of a Masonry-Infilled RC Frame

이 한선*

Lee, Han-Seon

우 성우**

Woo, Sung-Woo

ABSTRACT

The responses of a 1:5 scale 3-story masonry-infilled RC frame which was designed only for gravity loads were simulated by using a nonlinear analysis program, DRAIN-2DX. The objective of this study is to verify the correlation between the experimental and analytical responses of masonry-infilled RC frame.

It is concluded from this comparison that the strength and stiffness of the whole structure can be predicted with quite high reliability using compressive strut (compression link element, Type 09) while some local behavior cannot be described reasonably.

1. 서론

국내에서의 대부분의 중·저층 철근 콘크리트 구조물은 여러 가지 이유에 의해 조적채움벽을 사용하고 있다. 이러한 조적채움벽은 지진에 대해서 채움벽이 없는 골조와는 매우 다른 거동을 보인다는 것을 실험적으로 확인하였다.^{(1), (2)} 이런 조적채움벽을 가진 구조물은 극심한 지진이 발생했을 경우, 조적채움벽의 벽들의 파괴, 모르타르와 벽들사이에서의 균열 및 골조와 조적채움벽 사이에서의 균열 등에 의해 불연속적이고 고도의 비선형적인 거동을 일으키게 된다. 이러한 구조물의 비선형 거동을 해석적으로 예측하는데는 여러 가지 프로그램이 사용되고 있으며, 일반 구조물에 적용하기에 앞서 실험결과에 근거한 해석결과를 비교·검토함으로써 그 신뢰성이 확인되어야 한다. 본 논문에서는 기수행된 중력하중에 대해 설계된 1:5 축소 3층 조적채움벽을 가진 RC골조의 일방향 가력실험의 결과^{(1), (2)}와 비선형 구조해석 프로그램인 DRAIN-2DX^{(3), (4)}로부터 얻어진 해석결과를 서로 비교·검토함으로써 신뢰성을 확인하고, 프로그램의 적용에 있어서 한계점을 살펴보았다.

2. 해석모델

* 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원

** 고려대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원

2.1 재료모델

해석모델에 사용된 모델 콘크리트의 강도는 실험 당일 (112일) 재료실험의 평균 강도인 301.6 kgf/cm^2 (29.6 MPa)이고, 모델 철근의 강도는 주근 D3, 횡보강근 D2의 경우 각각 7130 kgf/cm^2 (699 MPa), 3470 kgf/cm^2 (340 MPa)이다.

콘크리트와 철근의 탄성계수는 각각 $E_c = 15000 \sqrt{f_{ck}} = 260500 \text{ kgf/cm}^2$ (25546 MPa)와 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ (206000 MPa)를 사용하였다.

2.2 구조물 모델

2.2.1 골조 해석모델

골조 해석 모델은 그림 1에서 보는 것처럼 DRAIN-2DX의 소성힌지 보-기둥 요소 (Plastic hinge beam-column element, Type 02)를 사용하였다. 이 모델은 부재의 중심선이 만나는 점을 절점으로 하고 각 부재 단부에 이 절점과 일정한 거리만큼 강접 부위 (Rigid end zone)을 둘 수 있으며 양단 부 강접 부위 사이에 소성힌지와 탄성 보 (혹은 기둥)를 두었다. 모든 보와 기둥에 대한 변형 경화율 (Strain-hardening ratio)은 4%로 가정하였으며 각 부재의 유효 단면 2차 모멘트 (I_{eff})는 ATC-40⁽⁵⁾에 따라 기둥에 대해서는 $0.7I_g$, 보에 대해서는 $0.5I_g$ 를 사용하였다. 보-기둥 요소의 거동 특성은 기둥과 보의 단면에 대해서 직접 계산한 축력 (P)과 모멘트 (M)의 값을 이용한 항복면을 정의함으로써 나타내었다.

2.2.2 조적채움벽 해석모델

조적채움벽에 대한 해석 모델은 DRAIN-2DX의 압축/인장 링크 요소 (Compression/tension link element, Type 09)를 사용하여 횡력에 저항하는 압축 스트럿 (strut)으로 나타내었다. 압축 링크 요소에 의한 스트럿의 거동 특성은 그림 2에서 보는 바와 같이 스트럿의 축 강성과 축 변위에 의해 삼선형 (Tri-linear) 관계로 표현되었으며, 그 입력 값은 그림 3에서 보는 바와 같이 실제 실험에서 나타난 구조물의 1층에서의 층간변위와 밀면 전단력의 관계에서 얻어진 조적채움벽의 강성과 변위 관계에서의 거동 특성 결과를 이용하였다.

실제 실험에서의 파괴 메카니즘은 2층 조적채움벽의 수평줄눈의 미끄러짐 파괴에 의한 층 파괴 메카니즘이다. 이는 그림 4(a)에 나타난 실험 모델의 일방향 가력실험이 수행되기 전에 수행된 지진모의실험에서 2층 조적채움벽의 가운데 부분에 균열이 발생하였기 때문이다. 이를 해석 모델에 반영하기 위해 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 2층 기둥의 가운데 부분에 절점을 추가하여 조적채움벽의 스트럿을 2개로 하였다. 1층과 3층 부분의 스트럿 (L1 과 L4)의 축 강성과 축 변위의 값은 앞에서 설명한 바와 같이 그림 3의 결과를 그대로 사용하였으나, 2층 스트럿의 축 강성 값은 L1 과 L4처럼 완전하게 벽체를 둘러싸는 골조가 형성되지 않기 때문에 스트럿의 축 강성이 크게 저하되었다고 판단하여 L1 과 L4에서 사용된 스트럿 강성의 1/3값을 사용하였다.

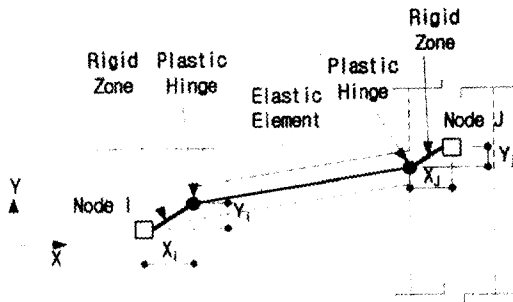


그림 1. 소성힌지 보-기둥 요소 (Type 02)의 구성

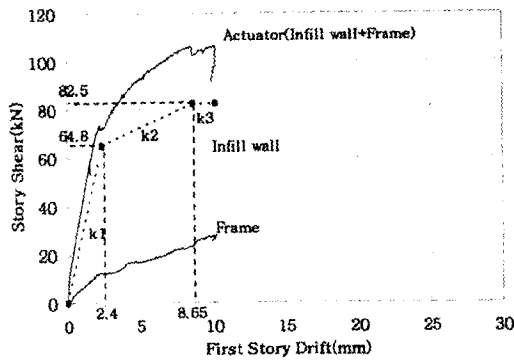


그림 3. 압축 링크 요소의 입력 값 (L1 and L4)

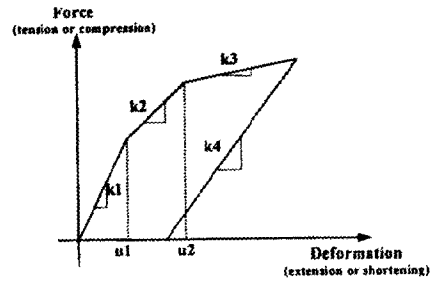
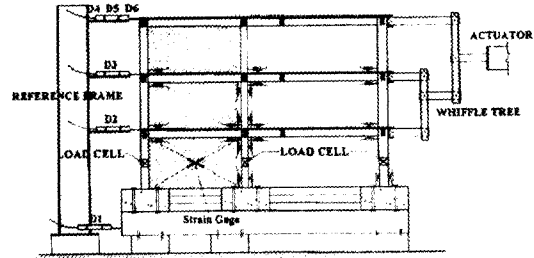
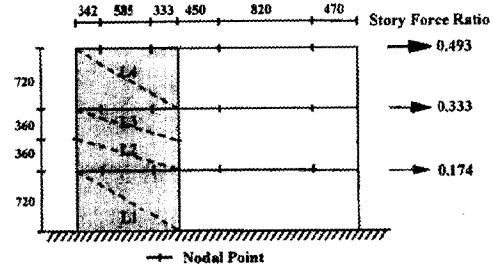


그림 2. 압축/인장 링크 요소 (Type 09)의 거동 특성



(a) 실험 모델



(b) 해석 모델

그림 4. 실험 모델과 해석 모델 (단위: mm)

3. 해석과 실험의 상관성

3.1 밀면 전단력과 층 변위와의 관계

그림 5는 밀면 전단력에 대한 옥상층 변위의 실험과 해석 결과를 비교하고 있다. 실험에서 옥상층 변위의 변위 능력 (displacement capacity)이 약 43mm로 나타났기 때문에, 해석에서도 옥상층 변위 43mm까지 일방향 가력 해석을 수행하였다. 등가 에너지 개념 (Equal-energy concept)에 의한 완전탄소성 (Elasto-perfect-plastic) 이선형 모델의 유효 항복 강도와 항복 변위 및 변위 연성비는 실험의 경우 각각 98.0 kN, 10.2 mm, 그리고 4.2이며, 해석의 경우도 실험과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 6에서는 각 층에서의 변위와 밀면 전단력의 관계를 비교하고 있다. 2층 바닥에서의 최종 변위의 경우 해석이 실험에 비해 약 2배 정도 더 큰 변위 값을 가지고 있으나, 각 층에서의 항복 강도, 극한 강도, 초기 강성 및 2층 바닥을 제외한 최대 층 변위의 경우 해석 결과와 실험 결과가 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

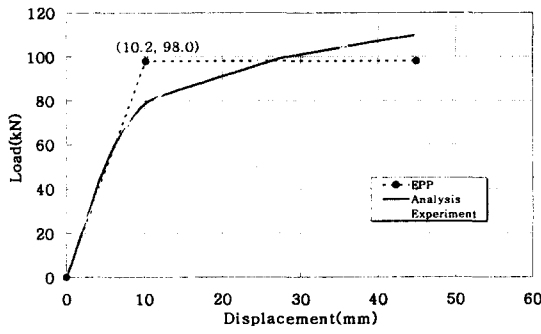


그림 5. 밀면 전단력과 옥상층 변위

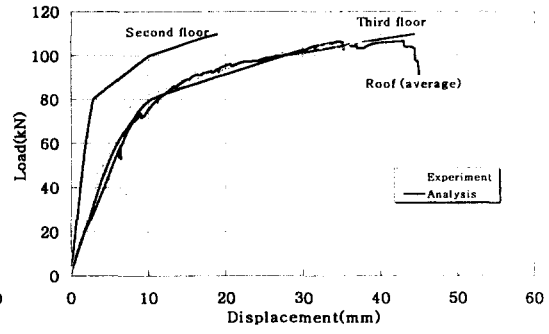


그림 6. 밀면 전단력과 층 변위

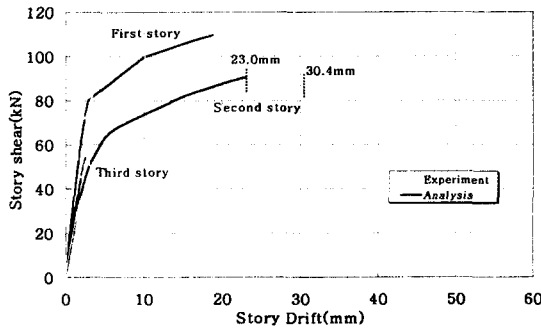


그림 7. 층 전단력과 층간 변위

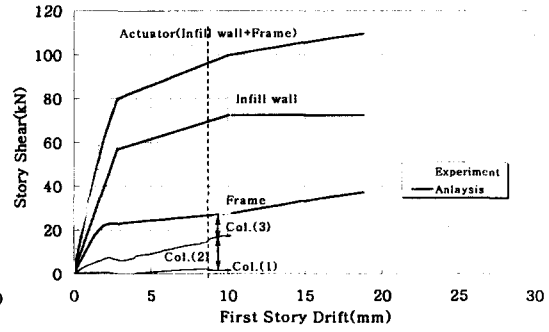


그림 8. 1층 기둥 전단력과 밀면 전단력

3.2 층 전단력과 층간 변위의 비교

그림 7에서는 각 층의 전단력과 층간 변위에 대한 관계를 비교하여 나타내고 있다. 실험과 해석 모두 손상이 2층에 집중됨으로써 최대 층간 변위는 모두 2층에서 일어나지만, 실험의 경우 약 30.4 mm (4.2%: 층간 변위율)이고 해석의 경우 23.0 mm (3.2%)로 나타나 약 1.3배정도 실험이 더 크게 나타났다. 또, 1층에서의 층간 변위는 실험의 경우 10.2 mm (1.4%)이나 해석의 경우 18.8 mm (2.6%)로 나타나 약 1.8배 정도 해석이 더 크게 나타났다. 강도와 초기 강성은 실험과 해석 결과가 거의 일치하는 것을 보여주고 있다.

3.3 기둥 전단력과 밀면 전단력의 비교

그림 8에서는 실험에서 얻어진 1층 기둥의 로드셀에서 측정된 기둥 전단력의 합과 밀면 전단력, 그리고 해석에서 나타난 1층 기둥 전단력의 합과 밀면 전단력을 1층 층 변위와 관련하여 나타내고 있다. 실험의 경우, 로드셀에서 측정된 기둥 전단력의 합은 적용된 횡하중 (밀면 전단력)의 약 20% 정도 (2 mm의 1층 층간 변위에 17%, 8.4 mm의 1층 층간 변위에 22%)를 나타냄으로써 조적 채움벽이 밀면 전단력의 약 80%를 지지하고 있음을 보여주고 있다. 또, 구조물 혹은 조적채움벽의 거동이 약 2.1 mm까지는 선형적으로 거동하다가 그 이후부터 비선형적으로 거동함으로써 강성의 변화를 잘 보여주고 있다. 해석의 경우에는 1층 기둥 전단력의 합이 밀면 전단력의 약 30% 정도

(2 mm의 1층 층간 변위에 35%, 8.4 mm의 층간 변위에 28%)이며, 구조물 혹은 조적채움벽의 거동이 약 2.9 mm에 가서 강성의 변화를 보여주고 있다. 골조 자체의 거동을 살펴보면, 실험에서는 초기 강성은 5.9 kN/mm이고 구조물이 파괴될 때까지 거의 큰 강성의 변화 없이 일정하게 증가하는 형태를 보여주지만, 해석에서는 약 2.0 mm까지는 초기 강성이 13.4 kN/mm으로 실험에 비해 약 2.3배 더 크게 나타났으며, 그 이후 8.4 mm까지는 1.5 kN/mm로 상당히 작은 강성을 보여주고 있다.

3.4 주요 부재 단부에서의 회전각 비교

각 부재의 소성힌지 부위에서의 전체 회전각은 계산에서 구해진 탄성회전각과 프로그램의 출력값으로 구해진 소성회전각을 더함으로써 구할 수 있다.

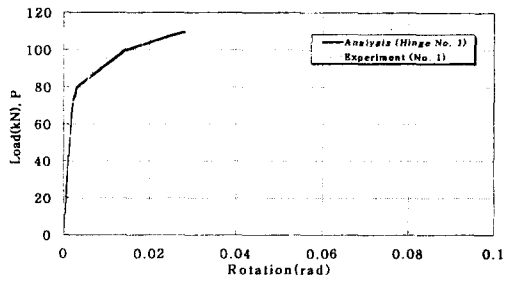
그림 9에서는 주요 부재의 단부에서 측정된 밀면 전단력에 대한 회전각의 실험 값과 해석 값을 비교하고 있다. 초기 회전강성의 경우 힌지 1에서 힌지 6까지는 해석 값과 실험 값이 잘 일치함을 보여주고 있으나, 힌지 7과 힌지 8에서는 약간의 차이를 보여주고 있다. 최대 회전각이 일어난 부분은 실험과 해석 모두 힌지 4 (2층 기둥 하단)로 나타났으나, 실험의 경우 그 값이 0.081 rad. 인데 비해 해석의 경우 0.051 rad.으로 나타나 어느 정도의 차이를 보여주고 있다. 각 부분에서의 최대 회전각은 실험 값과 해석 값이 부재에 따라 상당한 차이를 보여주고 있다. 전체적으로 보면 기둥에서의 회전각이 보에서의 회전각보다 대체적으로 잘 일치함을 보여주고 있다.

3.5 소성힌지의 생성

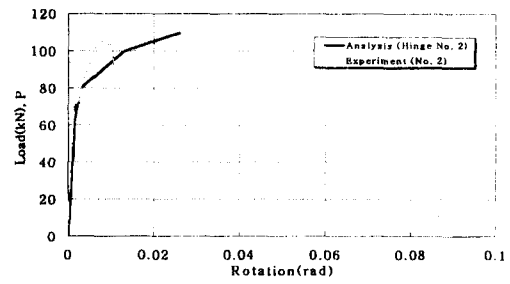
그림 10에서는 소성힌지가 생성되는 시점에서의 기둥의 각 부분에서의 모멘트-축력을 그 기둥단면에서의 항복면과 비교하여 나타내었다. 그림 10(a)에서 보는 바와 같이 기둥 No. 1에서 No. 5의 경우는 인장력 상태에서 항복하였고, 그림 10(b), (c)에서 보는 바와 같이 기타 기둥에서는 압축과 휨모멘트에 의해 항복한 것을 보여주고 있다.

3.6 소성힌지의 분포와 파괴 메카니즘의 비교

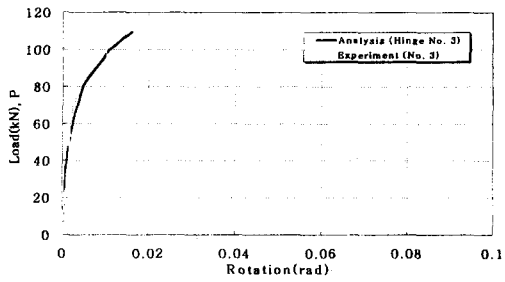
그림 11에서는 실험에서 나타난 구조물의 파괴 메카니즘과 DRAIN-2DX의 해석에 의한 구조물 전체에서의 소성힌지 분포 현황을 비교하여 나타내었다. 그림 10(a)에서 나타난 것처럼 실험의 경우 C₃ 기둥의 상·하부에서의 소성힌지, C₂ 기둥의 하부와 가운데 부분에서의 소성힌지, 짧은 경간에서의 조적채움벽의 미끄러짐에 의한 C₁ 기둥의 상부에서의 전단파괴 등에 의해 2층에서 파괴 메카니즘을 구성하고 있다. 그림 11(b)에 나타난 해석의 경우도 2층에서 파괴 메카니즘을 구성하고 있는 것은 실험과 유사하나, 2층 가운데 기둥 상부에서 소성힌지가 발생하고 모든 1층 기둥의 하부에서 소성힌지가 발생하는 등 실험과 약간 상이한 분포를 보여주고 있다. 즉, 실험에서는 골조의 균열 (소성힌지의 분포)이 2층부에 완전히 집중되어 있는 반면, 해석에서는 균열이 2층부에 어느 정도 집중되어 있을 뿐만 아니라 1층부에도 상당히 많이 나타나고 있다.



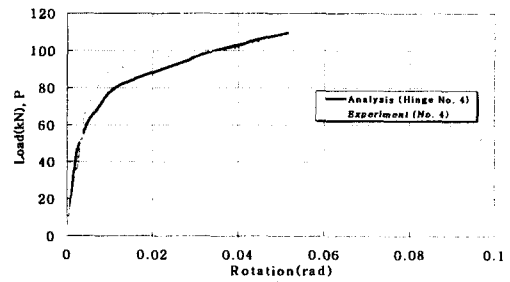
(a) 힌지 1



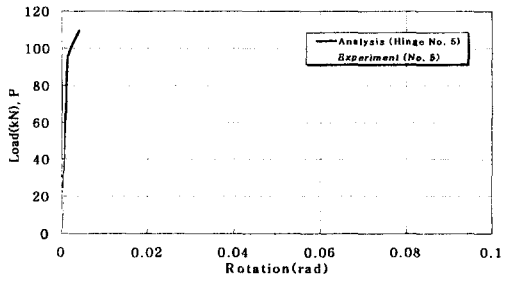
(b) 힌지 2



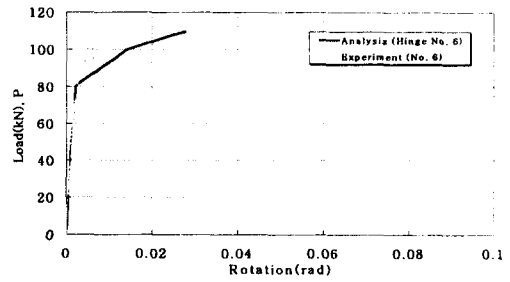
(c) 힌지 3



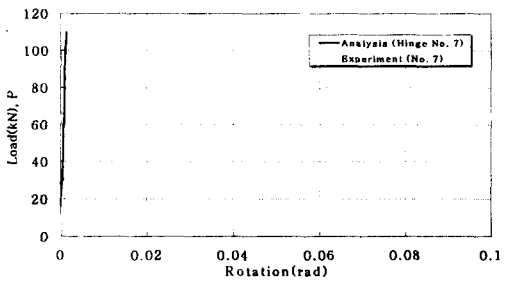
(d) 힌지 4



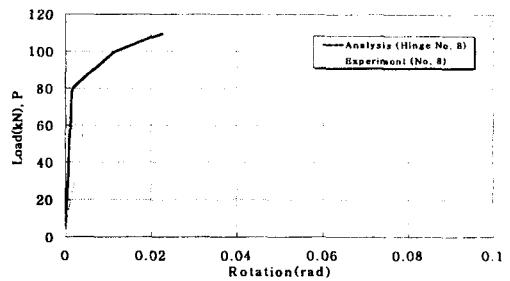
(e) 힌지 5



(f) 힌지 6



(g) 힌지 7



(h) 힌지 8

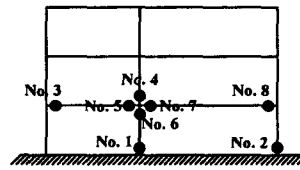


그림 9. 밀면 전단력과 회전각

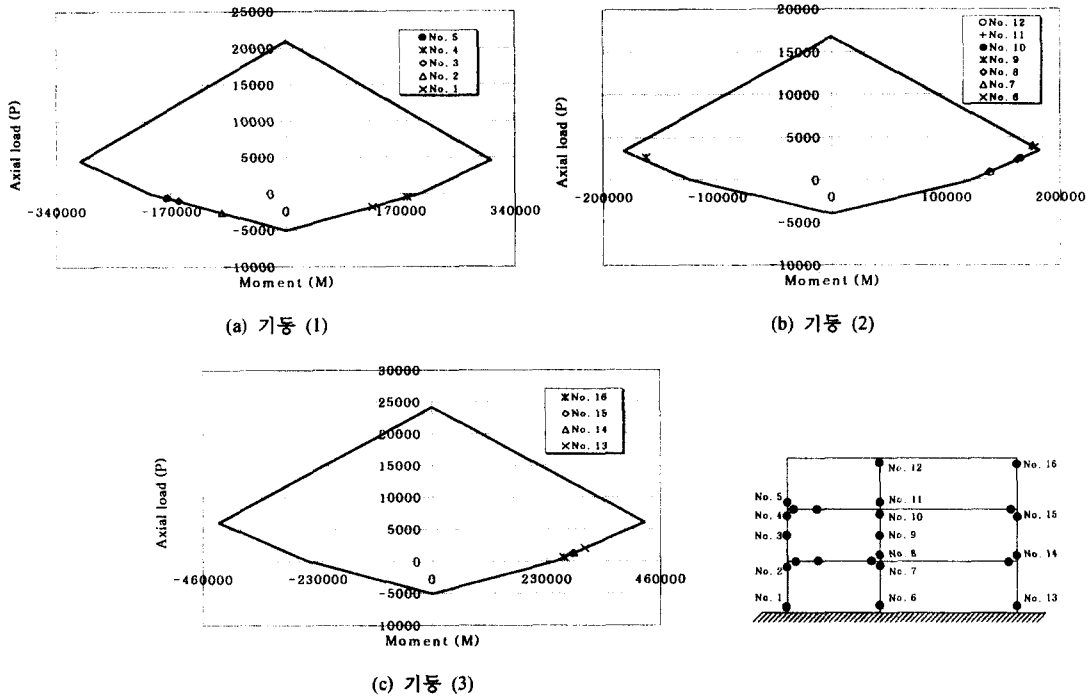


그림 10. 축력-모멘트 상관관계

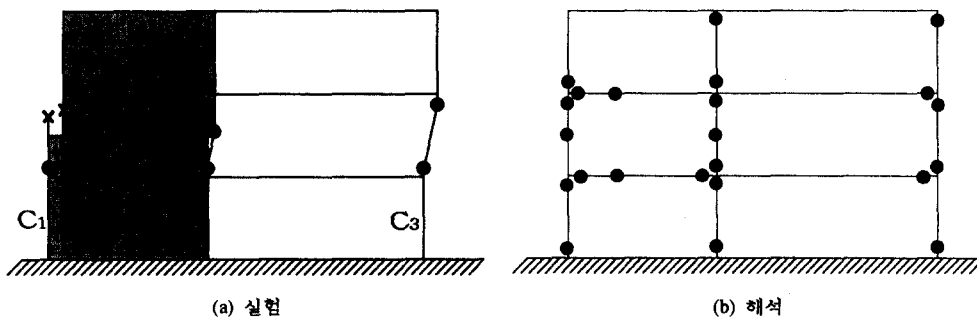


그림 11. 파괴 메카니즘

4. 결론

1:5 축소 3층 조적채움 RC골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성에 관한 결론은 다음과 같다.

(1) 밀면 전단력 (횡하중)과 옥상층 변위 및 각 층에서의 변위 관계에서 보듯이 구조물의 전체 거동에서 실험과 해석이 강성과 강도면에서 상당히 일치하는 결과를 보여주고 있다. 층 전단력과 층간 변위와의 관계에서 실험에서 손상이 집중된 2층에서의 연성능력을 정확하게 묘사하지는 못하였지만 나머지 강성과 강도면에서는 상당히 일치하는 결과를 보여줌으로써 압축 스트럿에 의한 조적채움 골조의 해석은 구조물의 전체적인 거동 양상을 알아보는 데 신뢰할 만한 것으로 판명된

다.

(2) 주요부재 단부에서의 회전각은 부재에 따라 실험과 해석 값이 차이를 보여주고 있다. 보에서 보다는 기둥에서 초기 회전강성의 경우 어느 정도 비슷한 결과를 예측하고 있기는 하지만, 최대 회전각의 경우는 정확하게 예측하지 못하고 상당한 차이를 나타내고 있으며, 결국 이것은 파괴메카니즘을 구성하는데도 영향을 끼친다. 이러한 차이는 실험 전의 구조물 2층 가운데 부분에서의 균열을 나타내기 위해 사용된 분할된 2개의 스트럿을 사용한 조적채움벽의 모델이 조적채움벽이 대부분의 중력하중을 담당하는 현상과 조적채움벽 사이의 마찰저항을 제대로 묘사하지 못하였고, 따라서 구조물의 국부 변형까지 정확하게 묘사하지는 못한 것으로 판단되며 이러한 변수에 대한 적절한 해석모델에 대해 보완 연구가 필요하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구에서 수행한 실험은 1997년도 건설교통부 국책과제인 "우리나라 중·저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해예측 및 보수보강법의 연구"의 일부로 수행되었고 해석은 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, Han-Seon, and Woo, Sung-Woo (2001), "Effect of masonry infills on seismic performance of a 3-storey R/C frame with non-seismic detailing," *Earthquake Engrg. Str. Dyn.*, Vol.30, No.12. (in press)
2. Lee, Han-Seon, and Woo, Sung-Woo (1999), "Pushover tests of 1:5 scale 3-story reinforced concrete frames," *KCI Concrete International Journal*, Vol.11, No.3, pp.165-174.
3. Powell, G. H., (1993), "DRAIN-2DX element description and user guide ver. 1.10," Report No. UCB/SEMM-93/18, University of California, Berkeley, California.
4. Prakash, V., Powell, G. H., and Campbell, S. (1993), "Drain-2DX base program description and user guide ver. 1.10," Reprot No. UCB/SEMM-93/17, University of California, Berkeley, California.
5. ATC (1996), "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings: Volume 1, 2," ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.