

깊은 보와 내부기둥 접합부에 대한 실험과 해석의 상관성

Correlation of Experimental and Analytical Responses of Interior Deep-Beam Lower-Column Joint

우 성우* 이 한선**
Woo, Sung Woo Lee, Han Seon

ABSTRACT

A typical structure was selected for a prototype and four 1:2.5 scaled models, representing the subassembly including the interior column and the deep beam, were constructed. The transverse reinforcement was designed according to ACI procedure and the procedure proposed by Sheikh. In this study, the correlation between the experimental and analytical responses of the subassemblies subjected to the cyclic lateral displacement were evaluated through investigation of lateral load-lateral deformation, local deformation characteristics by using a nonlinear FEM analysis program RCAHEST.

1. 서론

1995년 일본의 고베지진을 비롯하여 1999년 터키와 대만의 지진에서 보듯이 대형지진에 의한 피해는 국가 경제, 사회적인 면에서 큰 손실을 준다. 이러한 가운데 근래 우리나라에서 급증하고 있는 상부벽식-하부골조의 주상복합건물은 모멘트 저항골조나 벽식구조와는 달리 하부골조에서 연약층 파괴가 발생할 가능성이 높으므로 지진에 대한 대형피해가 우려되는 대표적인 예라고 할 수 있다. 따라서, 주상복합 구조의 하부에 집중적인 비선형거동이 발생할 경우 이 하부골조가 기둥의 소성힌지영역에서 적절한 연성 및 에너지 소산능력을 발휘하도록 설계하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 17층 주상복합 건물을 선정하여, 이 건물의 내부기둥에 대해 기존의 ACI 중진지역 내진상세¹⁾와 Sheikh가 제시한 식²⁾에 따라 설계한 후 전이보-내부기둥으로 이루어진 부분구조체를 1/2.5 축소 제작하여 반복횡하중 실험을 수행하였고, 수행된 실험결과를 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP³⁾에 철근콘크리트 평면응력 요소, 경계면 요소 등을 이식하여 모델화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST⁴⁾를 사용하여 해석결과와 비교·검토함으로써 신뢰성을 확인하고, 프로그램의 적용에 있어서 한계점을 살펴보았다.

2. 기둥의 설계 및 실험

기둥에 작용하는 축력은 고정하중과 적재하중 각각 630.07 tonf와 152.45 tonf이고, 기둥의 주근은 28-D25로 설계하여 0.4×기둥의 축하중강도(P_0)가 사용하중 시 축력보다 큰 값이 되도록 하였다.

* 정회원, 고려대학교 공학기술연구소 선임연구원, 공학박사

** 정회원, 고려대학교 건축공학과 교수

후프의 설계는 ACI 11-13식을 적용한 ACI의 중진지역 내진상세기준에 따른 설계¹⁾와 구속효과(α), 축하중의 크기에 따른 효과(Y_B), 단면의 요구연성(Y_ϕ)을 고려하여 Sheikh가 제안한 식²⁾에 따른 설계를 각각 적용하였다.

1/2.5 축소모델로 제작된 실험체에 사용된 콘크리트의 28일 평균 공시체 압축강도는 343 kgf/cm^2 이다. 철근의 경우 주근은 SD 40의 D10철근을 사용하였고, 횡방향 철근은 $\phi 4$ 일반 철선과 D5 철선을 사용하였으며, 인장실험을 수행결과 주근과 $\phi 4$ 일반 철선, D5 철선의 항복강도는 각각 $4,488 \text{ kgf/cm}^2$, $3,580 \text{ kgf/cm}^2$, $4,838 \text{ kgf/cm}^2$ 였다. 실험 변수는 설계법에 따른 횡방향 철근의 양과 상부하중의 크기로 상부하중의 크기는 상부하중이 $0.2P_0$ 일 때와 $0.3P_0$ 일 때로 나누어 71 tonf와 101 tonf의 상부축하중을 가하였다. 상부 축하중은 그림 1과 같이 기둥상부의 유압재키를 통하여 가력하였고, 이 축하중은 기둥을 통해 보경간의 1/4지점으로 흐르도록 실험장치를 설계하여 기둥의 거동에 따라 보에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 횡하중은 변위제어방식으로 가력하였으며, 1 mm에서부터 32 mm까지 11단계로 매 단계마다 각각 2회씩 반복하였고, 최종 12 단계에서는 기둥의 주철근이 완전히 좌굴되어, 피복이 박리될 때까지 가력하였다. 실험에서는 소성힌지의 위치와 횡력에 따른 주근의 위치별 거동을 파악하고자 그림 2와 같이 주근과 후프에 스트레인 게이지를 부착하여 후프의 위치와 종류에 따른 변형률의 변화를 파악하였다. 외부변위의 측정은 그림 3에서 보는 바와 같이 횡하중 가력위치에서 횡변위를, 축력이 작용함에 따른 보의 거동을 파악하기 위하여 하부변위를, 보의 단부에서 횡하중이 작용함에 따른 보의 회전각을 측정하였다. 기둥에도 수직방향과 대각방향으로 변위측정기를 설치하여 기둥의 전체거동에서 휨거동과 전단거동의 비중을 파악하였다. 실험에 관한 자세한 사항은 참고문헌 (5)에서 나타나 있다.

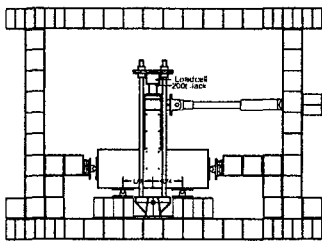


그림 1 실험장치

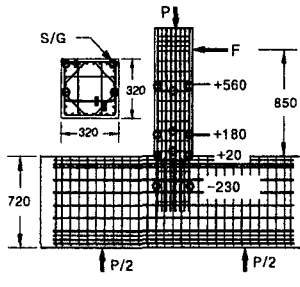


그림 2 실험체의 단면 상세 (단위: mm)

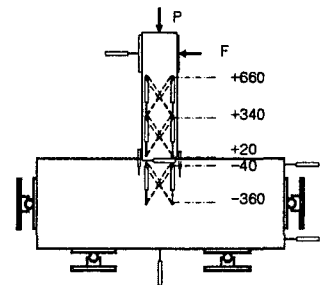


그림 3 변위계 위치 (단위: mm)

3. 해석모델

RCAHEST⁴⁾에서는 균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동을 위해서, 실제 주응력의 방향과 직각으로 균열이 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다. 균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 콘크리트의 초기탄성계수, 파괴 파라미터 (제하시의 강성의 감소) 및 등가의 소성변형률 (콘크리트의 응력이 0이 될 때의 변형률)의 함수로 이루어진 등가응력-등가변형률 관계로 표현하였다. 균열발생 후의 콘크리트 모델은 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 그림 4(a)에서 보는 바와 같은 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 그림 4(b)와 같이 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 그림 4(c)에 나타난 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 적용하였다. 철근의 항복 후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등을 동시에 고려하기 위해 그림 5와 같이 일정한 변형률 경화율을 가지는 삼선형 모델을 사용하여 고려하였다. 횡방향으로 배근된 철근에 의해 구속된 콘크리트의 압축강성을 표현하기 위한 압축응력-압축변

형률 관계에 대해서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 길이방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델을 사용하였다. 콘크리트 압축파괴 이후의 효과는 Kent 등에 의해 제안된 모델을 수정하여 고려하였으며 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴하였다고 판단하고 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하게 된다.

RCAHEST⁴⁾의 요소 라이브러리는 철근콘크리트 평면응력 요소, 경계면 요소, 스프링 요소, 셸 요소, 탄소성 평면응력 요소 등 여러 가지로 이루어져 있다. 본 연구에서는 그중 요소 타입 (Element type) 25인 철근콘크리트 평면응력 요소와 요소 타입 24인 탄소성 평면응력 요소 및 요소타입 26인 경계면 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 철근콘크리트 평면응력 요소의 경우, 파괴 기준 (Failure criteria), 각 방향당 가우스포인트의 개수, 콘크리트의 탄성계수, 프와송 비, 요소의 두께, 콘크리트의 압축강도와 인장강도, 콘크리트의 압축강도와 인장강도에 대한 조정계수, 철근의 탄성계수와 철근의 인장강도, 각 요소 방향에서의 요소 면적에 대한 길이방향 철근비, 요소방향과 철근방향의 각도, 각 요소 방향에서의 요소 면적에 대한 횡방향 철근의 비, 횡방향 철근의 구속효과를 나타내는 계수, 구속된 단면의 코어 면적에 대한 길이방향 철근의 면적 비 등이 중요한 변수로 작용된다. 그림 6은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 망이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등대개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부분에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄소성 평면응력 요소를 사용하였다.

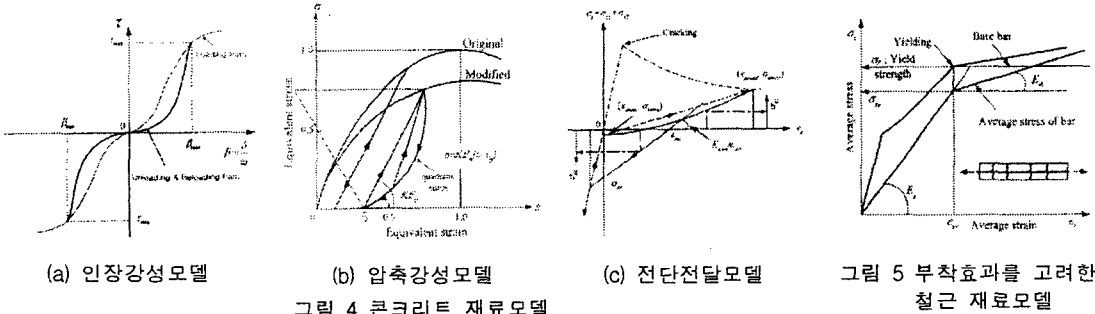


그림 4 콘크리트 재료모델

그림 5 부착효과를 고려한 철근 재료모델

4. 실험과 해석의 상관성

그림 7에서는 실험과 해석에서의 횡하중-회전위 관계를 비교해서 나타내고 있다. 실험의 경우 최대 횡하중을 살펴보면 Sheikh의 제안식에 따라 설계한 실험체와 ACI 중진지역 내진상세기준을 따라 설계한 실험체가 서로 비슷한 값을 보여주고 있고, 상부 축하중이 큰 경우가 작은 경우에 비해 좀 더 뚜렷한 강도감소 현상을 나타내었다. 또, 최대 횡하중의 0.85배를 항복하중으로 보고 각 기둥의 연성비를 구해보았을 때, 상부 축하중이 큰 경우 Sheikh의 제안식에 따라 설계한 기둥의 연성비는 약 3.7이고, ACI 중진지역 내진상세기준을 따라 설계한 경우에는 약 3.3으로 나타났다. 상부 축하중이 작은 경우는 Sheikh의 제안식에 따라 설계한 기둥의 연성비는

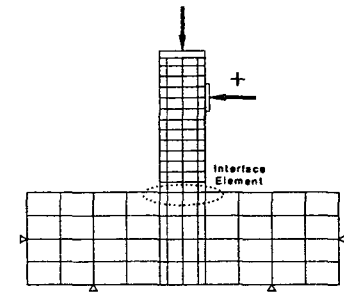
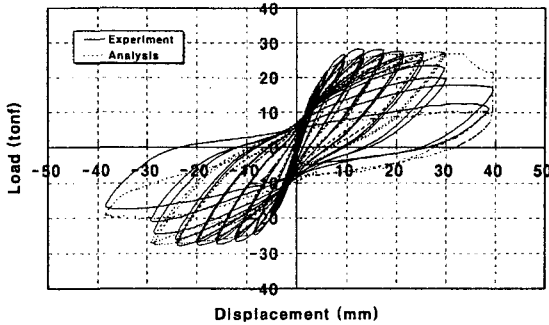


그림 6 요소분할

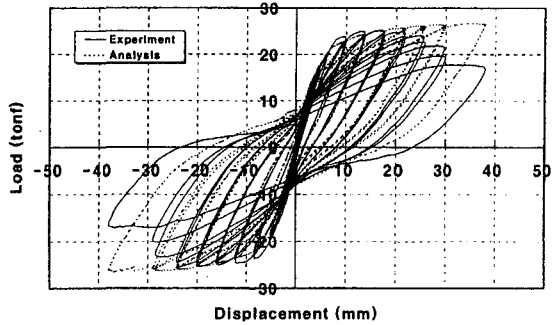
는 약 6.1이고, ACI 중진지역 내진상세기준을 따라 설계한 경우에는 약 4.3으로 나타나 상부 축하중이 큰 경우에 비해 다소 큰 차이를 보여주고 있다.

해석의 경우 실험과 비교해보면 상부 축하중이 큰 경우에는 (+), (-) 방향에서의 최대 횡하중이 서로 비슷하게 나타나고 강도감소도 뚜렷이 나타나며 연성비도 비슷하게 나타나 서로 아주 유사한 거동

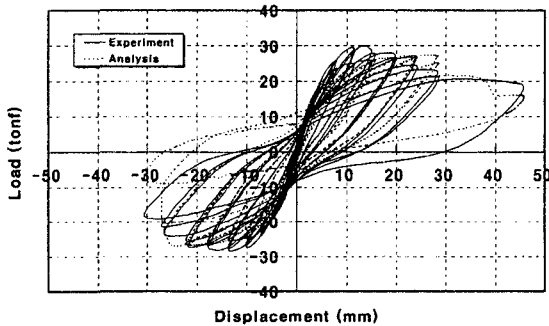
을 보여주고 있다. 상부 축하중이 작은 경우에는 전반적인 거동은 비슷하게 나타났으나, 실험에서 나타난 상세에 따른 강도감소 현상을 상부 축하중의 큰 경우만큼 정확하게 모사하지 못하고 있다.



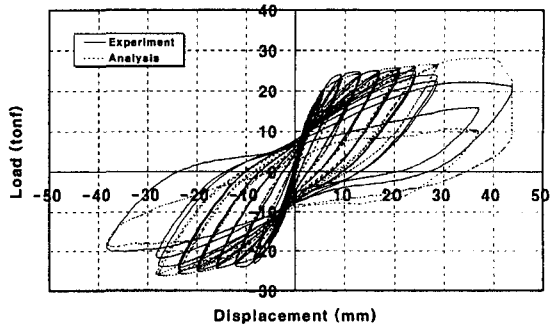
(a) 상부 축하중이 큰 경우 (ACI 중진지역 설계)



(b) 상부 축하중이 작은 경우 (ACI 중진지역 설계)



(c) 상부 축하중이 큰 경우 (Sheikh의 제안식)



(c) 상부 축하중이 작은 경우 (Sheikh의 제안식)

그림 7 횡하중-횡변위 관계

5. 결론

RCAHEST 프로그램의 평면응력요소와 경계면 요소를 사용한 깊은 보-내부 기둥 접합부의 비선형 거동모사에 대한 결론을 살펴보면, 접합부의 전체적인 거동을 나타내는 횡하중-횡변위의 관계로부터 상부 축하중이 큰 경우에는 실험과 해석이 상당히 유사한 거동을 나타내고 있어 그 신뢰성이 상당히 높으나, 상부 축하중이 작은 경우에는 전반적인 거동은 유사하지만 상세에 따라 강도감소 현상을 모사하는데 있어 다소 차이를 보여주고 있어 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 본다.

참고문헌

1. ACI 318-95, "Building Code Requirement for Structural Concrete", 1995.
2. S. A. Sheikh, S. S. Khoury, "A Performance-Based Approach for the Design of Confining in Tie Columns", ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 4, 1997.
3. R. L. Taylor, "FEAP-A Finite Element Analysis Program, Version 7.2", Users Manual, Vol. 1 and Vol. 2.
4. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
5. 이한선 외 4명, "주상복합구조에서 전이보와 내부기둥 접합부의 반복횡하중 실험", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 2000.