

# 벽식 아파트 구조에서 연결부재의 거동특성을 고려한 비선형 동적 응답

## Nonlinear Dynamic Response of Wall-Slab Apartment Building Considering The Behavior of Coupling Elements

김 기 현\*      장 극 관\*\*      서 대 원\*      천 영 수\*\*\*  
Kim, Ki Hyun      Chang, Kug Kwan      Seo, Dae Won      Chun, Young Soo

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate nonlinear behavior and estimate ultimate resistance of the wall structure against seismic loading. Experimental data for RC coupling elements are used for specifying the strength deterioration and stiffness degradation factor of hysteretic model. Modified coupling element models are used in the push over analysis and time history analysis. In the time history analysis, three earthquake waves are used in the analysis and their peak ground accelerations are changed to be 0.2g.

The conclusions of this study are as follows : (1) In the push over analysis , yielding of coupling elements occurred at lower story with small story drift ratio as 0.3%. (2) In the time history analysis, the story drift ratio is sufficient for the requirement of Korean Code, But coupling elements at most stories of the buildings occurred yielding. i. e. the earthquake resistant capacity of shear wall structures is not sufficient at 0.2g.

### 1. 서론

현재 국내에서 건설되고 있는 대부분의 아파트는 철근콘크리트 전단벽과 연결부재(coupling elements)로 구성된 벽식구조 형태를 취하고 있으나, 일반적으로 전체건물의 수평하중에 대한 해석시에는 바닥슬래브는 평면방향으로 강막효과(Rigid Diaphragm Effect)를 가지는 것으로 가정하며, 연결부재의 특성을 고려하지 않고 해석을 수행하고 있다. 그러나 이러한 벽식구조의 슬래브는 전단벽 사이의 개구부로 인하여 응력이 바닥판의 전폭에 균일하지 않고, 거실과 안방처럼 개구부의 크기와 차이에 따른 연결부재의 단면 변화로 인한 강도와 강성차이는 지진 등의 수평하중에 대해 구조적으로 예측할 수 없는 문제점을 야기시킬 수 있다. 또한 연결보의 경우에도 강성을 감소시켜 해석함으로써 정확한 벽식구조물의 거동에 대한 해석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 강성이 상대적으로 약한 장변방향에 대한 벽식구조 아파트의 장변방향에 대하여, 연결부재의 특성을 고려한 비선형 해석을 실시하여 거동특성을 조사하고, 내진성능을 평가하여 벽식아파트의 효율적인 구조설계를 위한 기초 자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 앞서 실험된 부분구조체 실험결과<sup>1)</sup>를 이용하여 도출한 국내 벽식구조의 연결부재의 강성저하 및 강도감소 등의 이력특성을 고려하여 입력변수를 조정하였으며, 이를 바탕으로 벽식아파트

\* 정회원, 서울산업대학교 건축공학과 대학원

\*\* 정회원, 서울산업대학교 건축학부 부교수

\*\*\* 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원 책임연구원

의 비선형 정적해석(push over analysis)과 비선형동적해석(time history analysis)을 수행하여 거동특성을 평가하였으며, 현행 내진기준에 대한 안전성을 평가하였다. 해석에 사용된 프로그램은 IDARC-2D Ver.5.0이다.

## 2. 해석 모델

### 2.1 연구대상 건물

해석대상 건물은 그림 1 과 같은 전형적인 평면을 갖는 벽식아파트 건물을 선정하였으며, 해석모델은 5층과 12층의 2가지 모델을 고려하였다. 보와 벽의 배근은 참고문헌 1에 자세히 수록되어있다.

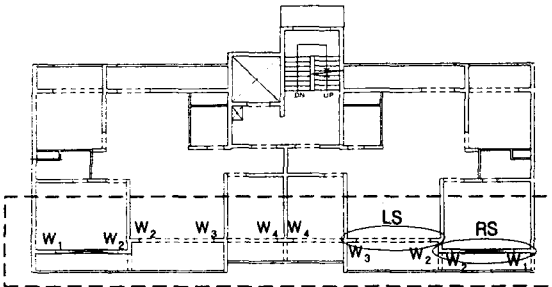


그림 1 해석대상건물의 평면

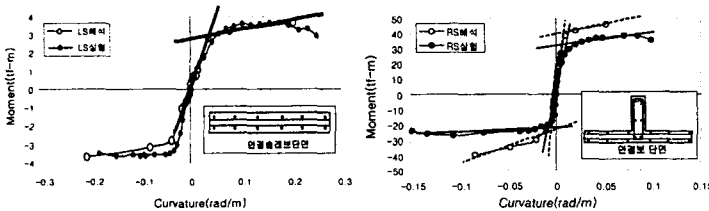
도시된 바와 같이 단면해석에 의한 항복점 및 강성변화가 실험값과 다소 차이를 나타내었다. 이는 전단에 의한 부재의 균열, 부착 반복하중에 의한 고려 등이 부재의 단면해석에서는 반영되지 않기 때문이며 부재모델에서 휨변형과 전단변형을 고려한 모델화가 필요하다. 따라서 연결보의 경우 역T형 부재임을 고려하여 정방향과 부방향에 각각 휨모델의 해석된 초기 강성값에 대해 전단변형이 고려된 일정치의 감소계수를 적용하였다. 이러한 감소계수는 단면해석상의 강성을 그대로 사용함으로써 발생할 수 있는 항복에 대한 과대평가와 부재곡률연성에 대한 오류를 고려 할 수 있다. 적용된 감소계수를 표 1에 나타내었다.

### 2.2 연결부재의 모델링(Modelling)

#### 2.2.1 주곡선(primary curve)

해석값에 의한 모멘트-곡률 곡선과 실험된 연결슬래브의 최대 내력포락선을 비교하여, 항복점, 초기강성 및 항복후 강성을 정의하였다.

춤-스팬비가 작고, 전단력이 크게 작용한 연결보(coupling beam, RS)의 주곡선은 그림 2(b)에



(a) 연결 슬래브

(b) 연결 보

그림 2 연결부재의 모멘트-곡률 곡선

표 1 해석에 사용된 입력변수

부재	강성		강성 저하	강도 감소	
	초기	항복후			
슬래브	단면해석값		2	0.1	
보	정방향	60%	70%	5	0.3
	부방향	50%	30%	3	0.2
벽체	단면해석에 의한 값				

#### 2.2.2 강도감소 및 강성저하

철근콘크리트 부재에 대한 적절한 이력모델의 사용은 부재의 비탄성응답 및 손상도의 예측에 있어서 가장 중요한 사항 중의 하나이다. 철근콘크리트구조의 이력곡선에는 강성저하, 강도감소 등의 현상이 반영되어 있고, 따라서 전단벽 구조부재에 선택된 이력모델들은 이러한 특성을 재현할 수 있어야 하지만, 전체구조물의 거동을 정확하게 묘사하기 위해서는 고려되어야 할 많은 변수와 불명확한 요소

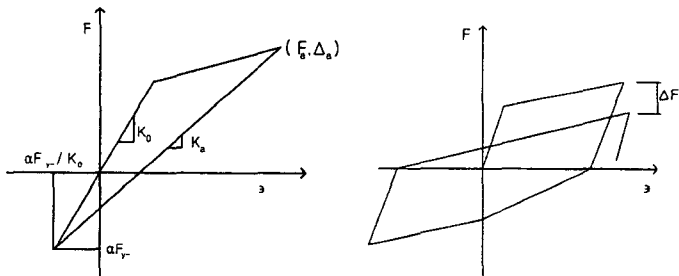
가 많기 때문에 가능한 한 단순화하여 근사적으로 해석할 필요가 있다.

이력모델상에서 부재의 성능저하를 나타내는 입력변수로는 강성저하 및 강도감소 등이 있다. 이중 강성저하는 이력곡선상에서 균열 및 전단의 영향을 명확하게 규명하지 않은 상태에서 정량화하는 것은 매우 힘들며, 구조적 특성이 유사한 부재, 즉 전단스팬비, 철근비, 축력 등이 비슷한 부재에 대한 Quasi-static 실험을 통하여 결정하는 것이 보통이다. 그러므로, 본 연구에서는 변위제어에 의한 전단벽 연결부재의 실험결과를 바탕으로 이를 결정하였다.

강성저하계수는 실험결과에 의한 이력곡선을 유사하게 재현하기 위해 그림 3(a)에 도시한 바와 같이 이력곡선상에서 하중이 역전되는 부근의 지향점을 파악하여 계수를 조정하였다. 또한, 강도의 감소는 그림 3(b)와 같이 부재의 구조실험을 통하여 얻어진 하중-변위곡선에서 에너지소산과 최대연성도의 비율을 이용하여 평가하였다. 반복하중에 의한 이력곡선상에서 강도감소계수를 구하기 위한 식은 식(1)과 같다.<sup>3)</sup>

$$S_{sd} = \frac{\Delta F_1 \delta_y}{\int dE} = \frac{\Delta M_1 \phi_y}{\int dE} \quad (1)$$

여기에서,  $\Delta M_1$  : 1 사이클에서의 강도감소,  $\int dE$  : 에너지소산면적



(a) 강도저감계수 (b) 강도저하계수

그림 3 해석을 위한 입력변수

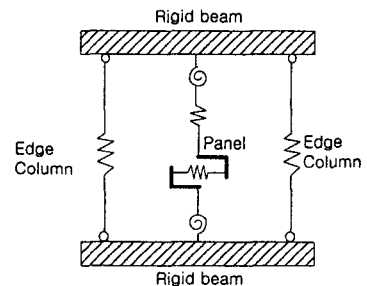


그림 4 벽체요소

### 2.3 전단벽 모델

해석에 사용된 비선형 해석프로그램 IDARC-2D는 전단벽의 모델링에 Kabeyasawa의 수직 삼선요소 모델을 사용하고 있으며 휨, 전단 및 축방향 강성을 갖는 것으로 표현된다.<sup>2)</sup> 이러한 강성들은 벽체의 중앙에 위치하는 보요소에 상호독립적인 전단스프링과 휨 스프링 및 축방향 스프링에 의해 모델링된다. 또한 평면유지의 가정을 적용하여 벽체의 네 모서리에 있는 절점들의 연직방향 변위로부터 벽체 상하부의 회전각을 계산하게 되며, 결과적으로 벽체의 상하단에는 무한강성의 보가 존재하는 것으로 고려하고 있다. 따라서 IDARC 프로그램에 적용되고 있는 벽체의 해석모델을 사용하여도 실제의 이력 거동을 적절히 예측할 수 있다고 판단되며, 그림 4에 벽체의 모델링에 사용되고 있는 전단벽 모델을 도시하였다.

## 3. 구조물의 해석 및 응답

### 3.1 해석대상건물의 특성 및 해석방법

해석대상건물은 그림 1에 도시된 전형적인 벽식 주거용 건물의 평면을 갖는 5층 12층 건물을 대상으로 장변방향에 대하여 해석을 수행하였으며, 해석모델은 연결부재는 실험에 의한 특성이 고려된 입력변수를 사용하였고, 벽체는 Kabeyasawa모델을 사용하였다.

해석방법은 구조물의 극한 내력 및 부재간의 파괴메카니즘을 검토하기 위하여 비선형정적해석을 수행하였으며, 지진하중에 대한 응답을 구하기 위해 비선형 동적해석을 함께 수행하였다.

### 3.2 비선형 정적해석

#### 3.2.1 해석방법

철근콘크리트 구조물의 비선형정적해석은 수평하중의 분포를 고정시킨 상태에서 수평하중을 점진적으로 증가시켜 부재의 항복흔지 발생과 층 항복 상태를 파악하기 위하여 수행하였다.  $i$ 층에서의 작용 수평하중의 분배는 식(2)에 의한다.<sup>3)</sup> 해석시 하중의 증가는 각 층의 강성저하가 급격히 일어나는 것을 막기 위해 적절히 세분화하여 증가시켰으며, 구조의 파괴시까지 해석을 실시하였다.

$$\Delta F_i = \frac{W_i \left[ \sum_{j=1}^m (\Phi_{ij} \Gamma_j)^2 \right]^{1/2}}{W_i \left[ \sum_{j=1}^m (\Phi_{ij} \Gamma_j)^2 \right]^{1/2}} V_b - F_i^{old} \quad (2)$$

여기에서,  $n$  : 층수,  $m$  : 모드,  $\Phi_{ij}$  :  $i$ 층의  $j$ 차 모드형상,  $\Gamma_j$  :  $j$ 차 모드에 대한 모드 참여계수  
 $M_i$  :  $i$ 층의 질량,  $V$  : 밀면 전단력

#### 3.2.2 해석결과

5층 및 12층 모델에 대한 비선형 정적해석을 실시한 결과 밀면전단계수(밀면전단력/총중량)와 최상층 변위와의 관계로서 그림 5에 나타내었다. ●는 전체골조의 항복이 발생한 시점을 나타내며, ○는 해석종료시를 나타낸다. 저층의 경우 횡력 저항부재인 벽체의 항복이 전체건물의 항복이전에 발생하지만, 층수가 증가할수록 연결부재의 영향이 커지며, 벽체의 항복이전에 연결부재의 항복이 집중적으로 발생하였다. 따라서, 초기에 연결부재의 항복에 의한 수평변위의 증가가 뚜렷하며, 그림 5에서 층강성이 고층벽식구조일수록 감소되는 원인으로 판단된다.

그림 6은 층전단력-층간변위 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 5층모델과 12층 모델 모두, 저층은 항복전단력이 매우 크게 나타났으나, 고층으로 갈수록 항복이 뚜렷하지 않고 항복강도도 떨어졌다.

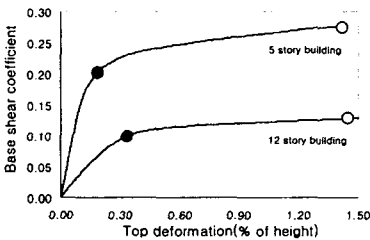
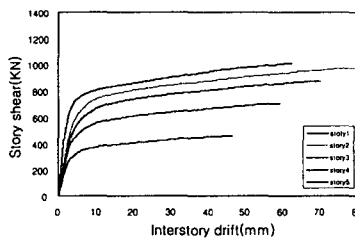
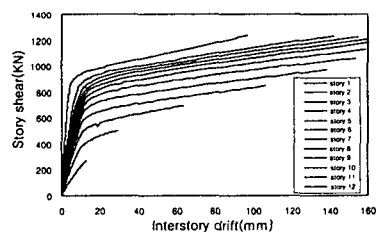


그림 5 성능곡선



(a) 5층 모델



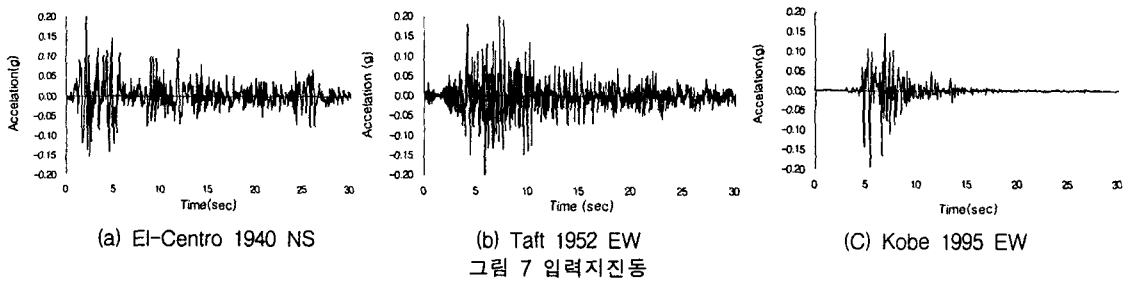
(b) 12층 모델

그림 6 층전단력-층간변위 곡선

### 3.3 비선형 동적해석

#### 3.3.1 입력지진동

동적해석법의 특징은 시간에 따른 응답의 변화를 관측할 수 있음으로 비교적 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있다는 것이다.<sup>4)</sup> 본 연구에서는 입력지진도으로서 시간이력해석에 일반적으로 많이 사용되어지는 El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Kobe 1995 NS의 3가지 과형(그림 7)을 사용하였으며, 0.2g로 최대가속도 값을 일정하게 조정하였고, 감쇠는 Rayleigh감쇠를 사용하였다.



#### 3.3.2 해석결과

5층 및 12층 모델에 대하여 동적해석을 수행한 결과, 각각의 최대 층간변위를 그림 8에 나타내었다. 5층 및 12층 모델 모두 국내기준의 층간변위 제한치인 층고의, 1.5%를 만족하였다. 이러한 층간변위 기준은 층의 과대한 변형으로 인한 구조부재의 손상을 막기위한 것으로 비록 국내의 제한기준을 만족하고는 있으나, 본 해석모델과 같은 벽식구조의 경우 연결부재(coupling slab)의 강성이 작고, 벽체의 강성이 매우 큰 구조로서 연결부재에서 항복이 발생하여 주요부재에 손상이 유발될 위험성이 높다고 판단된다. 따라서, 현행 실무에서와 같이 연결부재의 거동특성이 고려되지 않은 설계방법은 충분한 안전성을 가지고 내진설계가 수행되었다고 보기 어려운 것으로 사료된다. 또한 5층모델의 경우는 저층부에 최대층간변위가 발생하였으나, 고층인 12층 모델의 경우 상층부에서도 저층부와 비슷한 최대층간변위가 발생함에 주의할 필요가 있다.

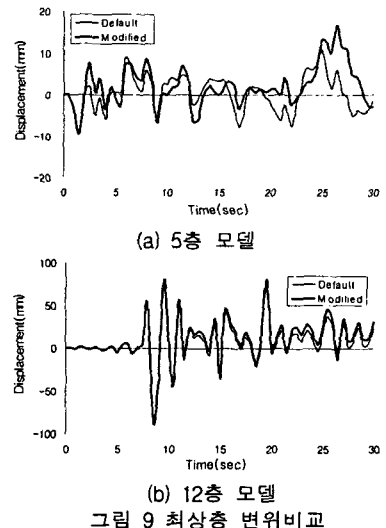
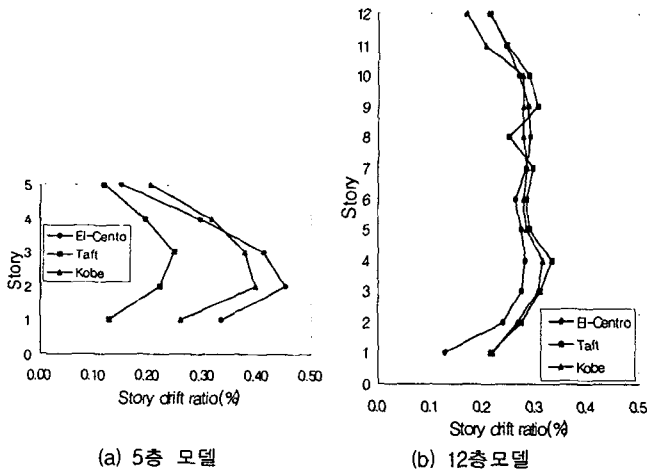


그림 9는 5층 및 12층 모델의 연결부재에 대한 실험값을 이용한 수정모델과 IDARC에서 기본으로 입력되는 이력변수를 사용한 모델의 가장 큰 동적응답을 도시한 것으로서 5층모델의 경우는 EI-Centro 1940 NS, 12층 모델의 경우는 Taft 1952 EW를 사용한 결과이다. 부재의 항복이 광범위하게 발생한 5층모델의 경우는 부재의 항복이 진행될수록 수정모델의 응답이 더 크게 나타나고 있다. 이는 수정모델의 경우 연결보의 전단변형을 고려하여, 감소계수를 조절함으로써 일반 골조에서의 보와는 달리 전단에 의한 강도 및 강성감소가 진전됨에 따라 연결보에서 변형이 크게 발생하기 때문으로 판단된다. 반면 그림 9(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 12층 모델의 경우에는 변위가 크게 발생하지 않고 부재의 항복도 연결부재 일부에 국한된 결과를 나타냄으로 수정모델과 기본모델과의 응답이 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 20초 이후 그 값의 차이는 점차 크게 나타남으로 부재의 항복 및 파괴가 진전될수록 5층 모델과 같이 수정모델에서 변위가 더 크게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 내진성능 평가를 위해 기존의 일반 골조에서 사용되는 보의 이력거동을 그대로 아파트 연결부재에 적용할 경우 지진에 대한 변위응답이 과소평가될 우려가 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

- (1) 국내 대부분의 아파트 구조시스템인 병렬전단벽구조에서 연결슬래브는 강성이 매우 낮고 휨력에 대하여 휨거동이 지배적이므로 단면해석에 의한 값을 그대로 해석에 적용하여도 전체 구조물의 거동에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 연결 보의 경우는 역 T형 단면효과 및 전단 변형 등의 영향으로 인하여 전체 구조물의 해석결과에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 해석시 오류를 막기 위해서 연결 보의 경우 이력변수의 수정이 반드시 필요한 것으로 사료된다.
- (2) 비선형 동적해석결과, 최대 지반가속도 0.2g의 지진동에 대하여 5층 및 12층 모델 모두 국내 내진 기준에서 제한하고 있는 층간변위 조건인 층고의 1.5% 이내의 응답을 나타내어 기준을 만족하였다. 그러나, 연결 보의 경우 허용기준보다 훨씬 낮은 층간변위(0.3-0.5%)에서 항복이 발생하여 손상이 발생하였으며, 이에 대하여는 설계시 주의할 필요가 있는 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 99 산학연 연구개발사업(과제번호: 건축-06-01)의 연구내용의 일부로서 한양대학교 초대형구조시스템연구센터의 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. 장극관, 천영수, 서대원, "벽식아파트 구조에서 연결부재의 거동분석," 한국콘크리트학회 논문집 제 14권 1호, 2002. 2., pp. 83-91.
2. R.E.Valles, A. M. Reinhorn, S,K,Kunnath, C.Li, A. Madan, "IDARC 2D 4.0 : A Program for the Inelastic Damage Analysis of Building," Technical Report NCEER-96-0010, State University of New York at Buffalo, 1996.
3. Mehdi Saiidi, Mate A. Sozen, "Simple and Complex models for Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structures," Report UILU-ENG-79-2013, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1979, pp.12.
4. J. M. Bracci, A. M. Reinhorn, J. B. Mander and S. K. Kunnath, "Deterministic Model for Reinforced Concrete Structures," Technical Report NCEER-89-0033, Department of Civil Engineering, State University of New York at Buffalo, 1989, pp.3-14.
5. ICBO, Uniform Building Code Vol.2, International Conference of Building Officials, 1997.