

# P.C 대형판넬 부분구조물의 Quasi-Static 실험연구

## Quasi-Static Test of Precast Concrete Large Panel Subassemblage

최정수\* 이한선\*\* 김우\*\*\* 홍갑표\*\*\*\*

### ABSTRACT

Large panel building systems are composed of vertical wall panels which support horizontal roof and floor panels to form a box like structure. The simplicity of the connections, which makes precast concrete economically viable, causes a lack of continuity in stiffness, strength and ductility. This precast concrete large panel systems typically have weak connection regions.

Three types of 2-story full-scale precast concrete subassemblages were tested under reversed cyclic loading. The seismic resistance capacity and failure mode of each system are compared in connection with the characteristics of joint connection details.

### 1. 서론

인구증가와 더불어 산업발전에 따른 인구의 도시집중, 핵가족화 현상등으로 인하여 주택의 대량공급에 대한 필요성이 증대되고 있다. 날로 더해가는 건설도입의 상승과 현장 인력난을 해결하면서 급증하는 주택수요를 충족시키는 가장 효율적인 해결책은 공업화 주택생산이라고 볼 수 있다.

또한 도심지와 그 주변지역의 지가가 급격히 상승하고 가용대지가 날로 줄어드는 현 시점에서 아파트의 고층화가 필연적이라고 하겠다.

이러한 상황에서 1988년 이래 건축법에 의한 내진설계가 의무화 됨으로써 구조기술자의 입장에서 볼때 새로운 차원의 문제에 도달하게 되었다.

즉, 기존 현장타설 철근콘크리트 구조시스템과 매우 상이한 구조특성을 가진 P.C (precast concrete) 시스템의 고층화에 대해서 내진공학의 입장에서 안전성을 검토 확인할 뿐만 아니라 P.C 공법 원래의 시공성 및 경제성에서의 우위를 여전히 보유하도록 조치하여야 한다는 점이 이것이다.

그러나 P.C 구조시스템은 접합부에서의 구조특성의 불연속과 공법에 따라 접합부 상세가 매우 다양하여 이의 종국파괴에 이르기까지의 구조거동 예측을 일반 현장타설 철근콘크리트의 경우와 같이 이미 확립된 체계적인 이론에 의해 일률적으로 예측하기가 거의 불가능한 실정이다.

따라서 본 논문은 현재 우리나라에서 건설되고 있는 대표적인 P.C 시스템 3가지를 선택하여 2층 높이의 실물크기 부분구조물을 제작, 지진과 같은 주기적인 반복하중을 가하여 각 접합부 및 판넬의 설계 및 시공방법에 따른 구조거동특성의 차이를 관찰하였다. 이 실험결과를 바탕으로 내진성능과 관련하여 P.C 시스템이 가질 수 있는 취약성을 분석하고 이의 보완책을 고찰하여 보았다.

### 2. Quasi-Static 실험

#### 2-1. 실험체 계획

실험체는 P.C 아파트 구조물의 내진거동을 가장 근접하게 나타낼 수 있으면서도 실험실의 제약조건을 만족할 수 있도록 형태와 규격을 선정하였다. (그림 1c) 그림 1a와 같이 실이 2개인 단위평면을 갖는 아파트의 단면방향의 거동을 대표하는 중앙의 전단내력벽과 인장 또는 압축재 역할을 하는 장변방향의 벽체 일부를 포함시켜서 수평 및 수직접합부를 갖는 합성벽(composite couple wall) 형태로 하였다. 실험체의 높이는 2층 높이로 하였다.

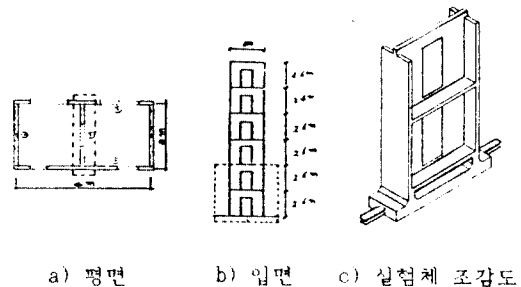


그림 1 실험체 선정

현재 국내에서 사용하고 있는 P.C 공법중에서 설계방식과 접합상세가 서로 다른 3개의 공법을 선정하여, 해당공법에 의해 실험체를 각 1개씩 제작하였다. 각 공법에 따라 벽체의 두께 및 철근배근 양식, 접합부 양식에 차이가 있다. 특히 표 1과 그림 2에 나타나 있듯이 수평접합상세는 현격한 차이가 있다.

\* 정희원, 연세대 대학원 건축공학과 석사과정

\*\* 정희원, 대한주택공사 주택연구소 선임연구원

\*\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\* 정희원, 연세대학교 건축공학과 조교수

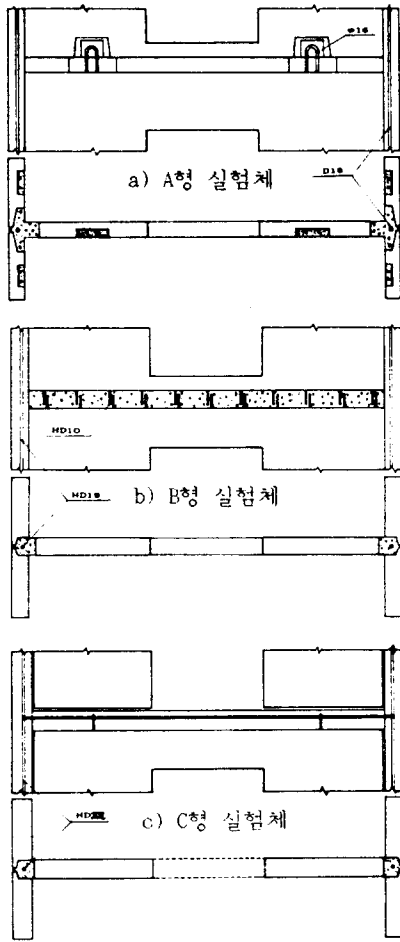


그림 2. Joint Schematic Drawing

표 1 각 공법의 비교 (단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

분류 \ 실험체명	A	B	C
Conc. PC 판	210	270	210
접합부	210	270	210
철근 PC 판	3000	4000	4700
접합부	2400	4000	4700
수평접합부	건식 Hook용접	습식 Dowel Bar	습식
수직접합부	습식 전단코터	습식	습식 전단키
슬라브두께	12 cm	14 cm	18.5 cm

A형 실험체의 수평접합부는  $\phi 16$  후크(hook)철근을 상부벽에 매입되어 있는 철판(plate)에 용접한 후 모르타르로 충전하도록 되어 있는 것이 특징이

고(그림 2a), B형 실험체의 특징은 상하벽체의 전단은 상하벽체에서 내민 10cm 길이의 Dowel 철근에 의해 지지되도록 되어 있고, 수직접합부를 관통하는 HD19의 Tie 철근에 의해 힘에 저항하도록 설계되어 있다. C형 실험체는 수평접합부에 아무런 전단보강철근이 없이, 자중에 의한 전단마찰개념을 사용하여 사춤르타르에 의해서만 전단에 지지되도록 되어 있고, 힘에 대해서는 수직접합부를 관통하는 HD22의 Tie 철근이 저항하도록 설계되어 있다.

### 2-2. 재료시험

실험체에 사용된 콘크리트와 철근의 재료시험 결과는 표 2에 나타나있다.

표 2 재료시험강도 (단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

분류 type	콘크리트 벽체	접합부		수직 철근	후크 (hook)
		콘크리트	몰탈		
A	179.5	132.5		3100	3500
B	262.5	177.2		4085	
C	181.5	115.4	144	4003	

### 2-3. 실험방법

실험체 설치상황은 그림 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 반력벽에 50ton MIS Actuator를 설치하여 가력기구(Loading device)와 연결되어 수평력을 가하고 가력은 변위제어 가력방식을 채택하였으며 변위력은 그림 5에 나타난것과 같이 하중작용점에 설치된 LVDT에 의해 제어됐으며, 3 cycle (1cycle=3min.)을 1 단계로 하여 변위연성의 일정배수로 진행하였다. 변위측정은 LVDT, Potensiometer를 사용하여 수평변위, 미끄러짐, 벌어짐, 전단변형 등을 측정하고 철근의 변형도는 주요부위에 부착된 W.S.G.로 부터 컴퓨터 온라인 시스템에 의해 자동측정되었다.

sensor의 위치는 그림 4에 표시했다.

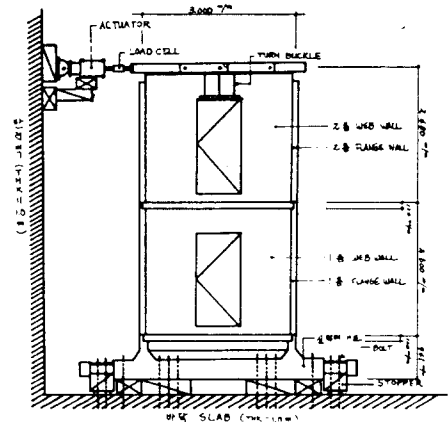


그림 3 실험체 setup

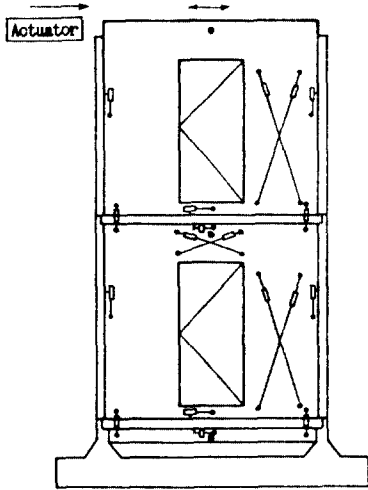


그림 4 sensor 위치

LOADING HISTORY

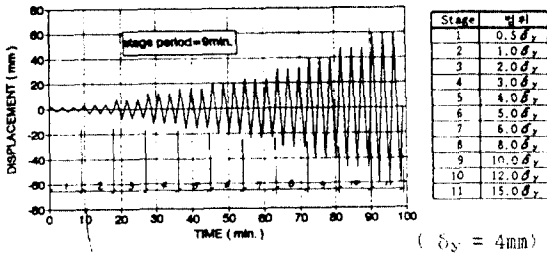


그림 5 변위이력

3. 실험 결과 및 분석

각 실험체의 결합부 연결방식과 관련하여 실험에서 얻은 데이터와 관찰된 균열 및 파괴양상을 종합하여 구조거동 특성을 분석하였다.

3.1 균열 및 파괴양상

똑 같은 조건에서 실험하였으나 시공방식과 결합상세가 다르게 제작된 각 실험체의 최종파괴양상은 서로 매우 다르게 나타났다. 그림 6에 개괄적으로 나타나 있듯이, A형 실험체는 결합부가 파괴되기전에 전단균열에 의한 개구부상부 인방보의 파괴에 의해 붕괴되었다. (wall failure; 그림 6a)

B형 실험체는 과도한 수평결합부의 벌어짐에 의해 수직 Tie 철근의 항복과 절단에 의해 파괴에 도달하였다. (joint opening failure; 그림 6b)

C형 실험체는 상하벽체의 수평결합부에서 상대적인 미끄러짐에 의한 수평결합부 전단파괴 양상이었다. (joint sliding failure; 그림 6c)

각 실험체의 개략적인 거동은 다음과 같다.

(1) A형 실험체

첫 균열은 2단계에서 수평결합부에서 발생하였다. 이 후 3 단계에서 1층 개구부 상단의 양쪽 구석에서 생겼으며 4-5 단계에서 수직결합부 및 개구부 양측 벽면에 균열이 발생하고 6 단계에서 1층 수평결합부의 수평균열 및 1층 개구부 상단 린넨부분이 균열심화되고 10 단계에서 1층 개구부상부의 콘크리트의 분리가 일어나면서 11단계에서 이의 떨어짐으로 인하여 실험을 중단하게 되었다. 여기서 특기 할것은 수평 결합부는 수직결합부에 많은 균열, 미끄러짐, 벌어짐이 있었으나 철근의 절단에 의한 파괴는 일어나지 않았다는 사실이다. 이 실험체는 수평 결합부의 강도가 상대적으로 커서 벽판넬의 개구부 린넨부분에서 콘크리트가 떨어져 나감이 최종붕괴원인이 되었다.

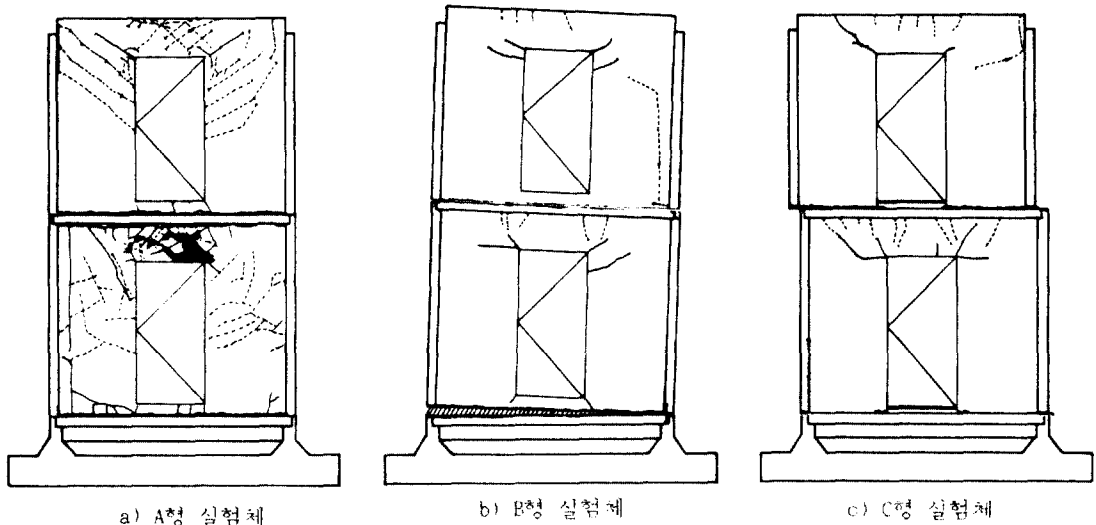


그림 6 실험체의 균열 및 파괴양상

(2) B형 실험체

첫 균열은 2 단계에서 1,2층 개구부 상단 좌우 모서리에서 생겼으며 4 단계에서 1층 바닥면에서 벌어짐이 생기고 그 후 5 단계에서 1층 개구부 상단 모서리에서 균열이 심화되었으나 최종 파괴는 1층 바닥 수평접합부의 과도한 벌어짐에 의한 수직tie 철근의 절단에 의해 일어났다. 이 실험체는 1층 수평접합부의 dowel bar의 부착력이 검차적으로 감소되어 이 부분의 벌어짐이 주요 파괴형상이 되었고 상부 구조체는 대체적으로 매우 작은 손상을 입은 것이 그 특징이다.

(3) C형 실험체

첫 균열은 1 단계에서 1,2층 개구부 상단 모서리에 생겼으며 3 단계에서 2층 수평접합의 균열이 발생하고 5 단계에서 1,2층 개구부 상단 모서리의 균열이 심화되고 그 이후로는 2층 수평접합부에서 미끄러짐(sliding)에 의한 좌우 이동이 주요거동이었다. 이후 2층 벽체와 1층 이하의 구조체는 더 이상의 손상을 받지 않고 있다.

3-2. 하중-변위곡선(force-displacement curve)

실험에서 얻은 데이터로부터 실험체 중앙상단에서의 수평하중과 변위와의 곡선을 그림 7에 나타내었다. 여기서 A형 실험체 곡선은 철근콘크리트 모멘트 연성골조의 그것과 유사하며 큰 변위연성(displacement ductility)과 에너지 소산능력(energy dissipation capacity)을 가짐을 볼 수 있다. B형 실험체는 3 단계에서 최대강도를 보이며 그 이후로 급격히 떨어지나 변위연성과 에너지 소산능력은 대체로 양호하다. C형 실험체는 타 실험체에 비하여 최대강도와 변위연성 및 에너지 소산능력이 작음을 볼 수 있다. 그림 8은 각 실험체의 각 단계에서의 최대하중 포락선으로 각 변위에서

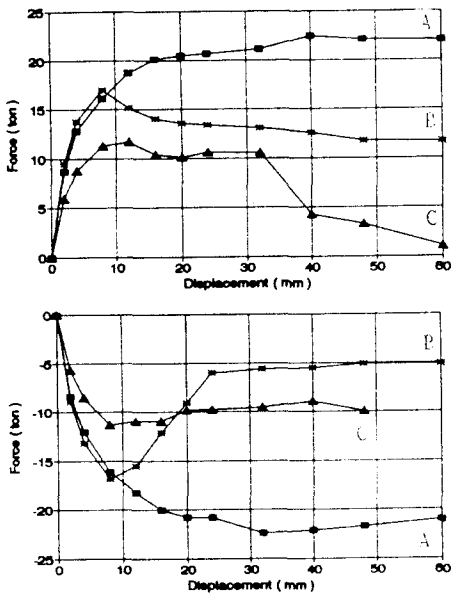
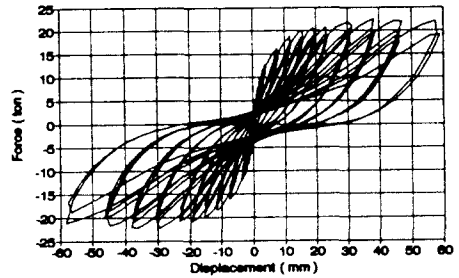


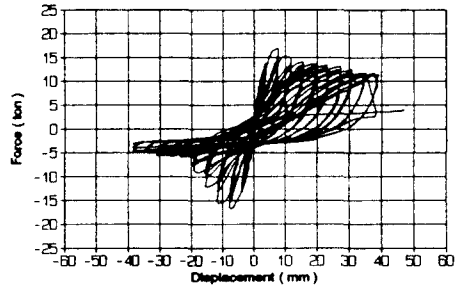
그림 8 각 실험체의 포락선

의 세 시스템의 최대강도 차이와 에너지의 소산능력을 쉽게 관찰할 수 있다.

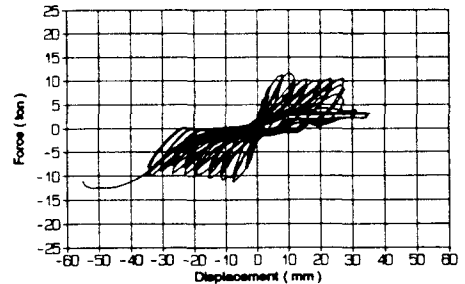
Hysteresis P-D Relationship at the Top of the Prototype



a) A형 실험체



b) B형 실험체



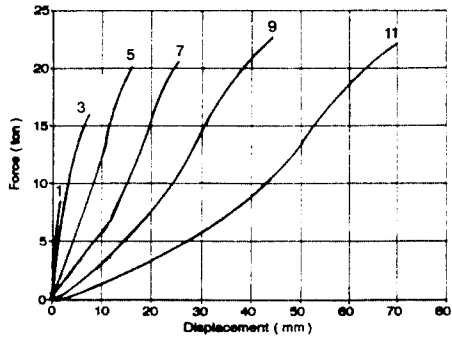
c) C형 실험체

그림 7 각 실험체의 하중-변위곡선

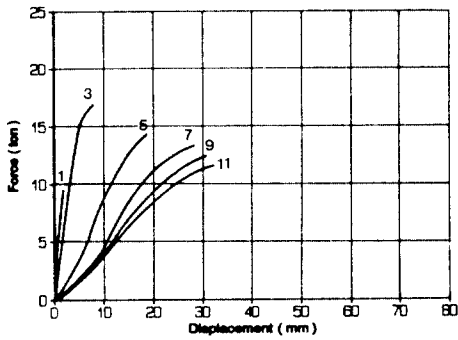
3-3. 강성의 변화

그림 9는 홀수 단계의 첫번째 cycle 1강한의 하중-변위 곡선을 가려서의 강성을 원점으로 평행이동하여 얻은 것으로서 변위 증가에 따른 강성 변화를 쉽게 알 수 있도록 한 것이다.

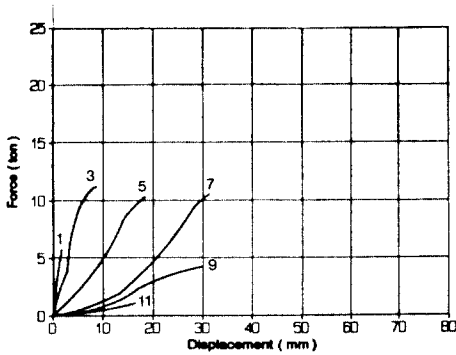
A형 실험체는 전반하게 강성이 저하되며 B형 실험체는 3 단계 이후로 급격히 강성이 저하되며 C형 실험체는 큰 강성저하를 보인다. 위 세 실험체는 모두 이력 루프의 찢힘(pinching) 현상이 현저하게 보이고 있는데 이 것은 콘크리트의 철근의 부착력이 항복에 들어서면서 점점 감소되어 철근의 콘크리트의 복합작용이 감소됨으로써 하중에 대한 변위량이 커져 일어나게 된다.



a) A형 실험체



b) B형 실험체



c) C형 실험체

그림 9 각 실험체의 강성의 저하

각 sensor에서 얻은 data로 부터 파괴모드에 큰 영향을 미치는 것을 plotting 하였다.

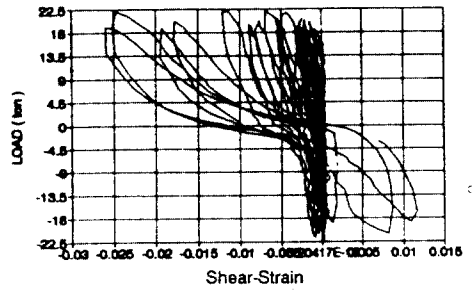


그림 10 1층 코어의 전단변형(A형 실험체)

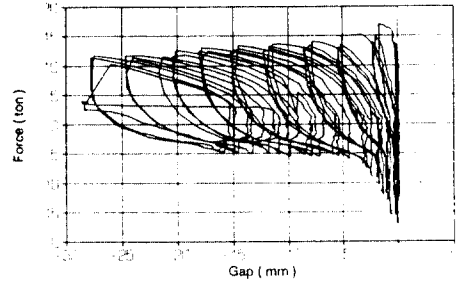


그림 11 1층 opening (B형 실험체)

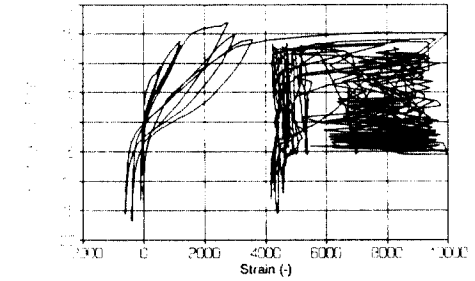


그림 12 1층 수직철근 strain(B형 실험체)

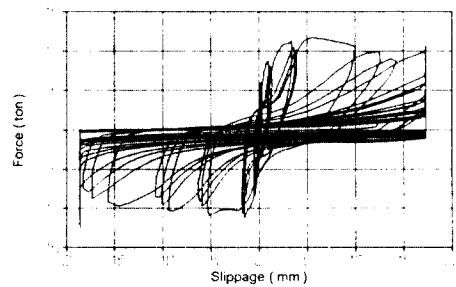
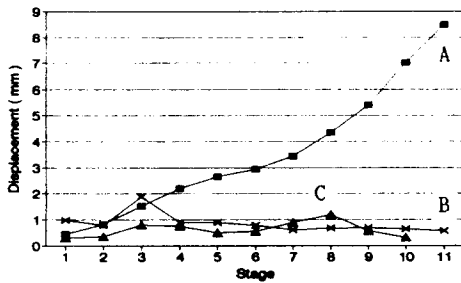
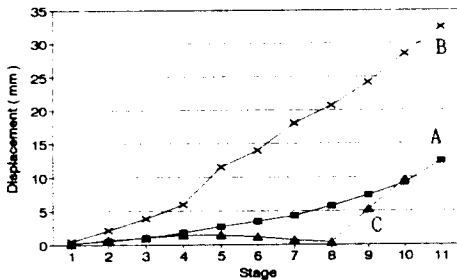


그림 13 2층의 slippage(C형 실험체)

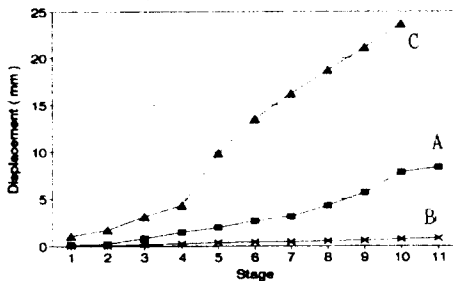
3-4. 상부의 변위에 대한 각 부분의 분담  
 2층 상부의 하중작용점에서의 변위에 대한 기타 주요부위에서의 미끄러짐, 전단변형, 벌어짐등의 기여도가 그림 14에 나타나 있다.



a) 1층의 shear deformation에 의한 변위



b) 1층의 gap-opening에 의한 변위



c) 2층의 shear-slippage에 의한 변위

그림 14 각 부분 변위의 비교

## 5. 결론

이상의 제한된 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) A형 실험체는 수평 및 수직접합부의 접합부가 상대적으로 강하여 1층 개구부 린넬에서의 과도한 균열이 최종 붕괴원인이 되었으며 연성 및 에너지 소산능력이 매우 커 양호한 내진성능의 거동을 보여주고 있다.

2) B형 실험체는 1층 수평접합부의 dowel bar의 부착력이 점차적으로 감소하다 3 단계 이후로 갑자기 떨어짐으로써 벌어짐(opening)에 의한 파괴가 일어났으며 어느 정도의 연성 및 에너지 소산

능력을 보여주고 있다. 따라서 수평접합부의 부착력의 조기손실을 초래하지 않도록 수직접합부에서 수직 tie철근을 보강해 준다면 좀더 양호한 이력 거동을 나타낼 것으로 생각한다.

3) C형 실험체는 2층 수평접합부에서 미끄러짐 파괴(sliding failure)가 일어났으며 연성 및 에너지 소산능력이 매우 작아 수평접합부의 설계시 미끄러짐에 대한 특별한 보강을 해야 할 것으로 판단된다.

위와 같은 결과로부터 얻을 수 있는 중요한 사실은 접합부 방식에 따라 파괴양상이 전혀 다르게 나타날 수 있다는 것이다. 따라서 내진설계시 진하중산정에 있어서 구조물의 파괴형상에 따라 반응수정계수 R 값이 달리 적용되었듯이 P.C 구조의 각 접합부 상세특성에 따라 실험을 통하여 다른 값을 적용하는 것이 합리적이라 판단된다.

## 참고 문헌

1. M.G.,Oliva, R.W., Clough, M.Velcov, and P. Gavrilovic, "Correlation of Analytical and Experimental Response of Large Panel Precast Building System". Report No.UCB/EERC-82.20, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, May 1988.
2. R.W.,Clough,F.,Malhas,M.G.,Oliva,"Seismic Behavior of Large Panel Precast Concrete Walls: Analysis and Experimental", Journal of PCI,September-October,1989
3. Peter Mueller,"Hysteretic Behavior of Precast Panel Walls",JCI,Vol.1,Tokyo,October 1986
4. J.M.,Vallenay,V.V.,Bertero and E.P., Popov, "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls," Report No. UCB/EERC-79.20, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, August 1979
5. M.Velcov, "Large Panel Systems in Yugoslavia : Design Construction and Research for Improvement of Practice and Elaboration of codes," Proceedings, ATC-8 Seminar on Design of Prefabricated Concrete Buildings for Earthquake loads, Los Angeles, April 1981
6. 정하선, 김두영, "고층 P.C아파트의 접합부 설계" 한국콘크리트학회발표논문집 제1권1호, 1989.1 1월
7. 오영훈 "고강도 콘크리트를 사용한 R/C 전단벽의 강도와 변형 능력" 한양대학교 대학원, 1990.6.
8. 주경재, 이리형, 홍성목, 마춘경, 김상식, "고층 피씨(P.C)화 연구" 대한건축학회 연구보고서, 1986.5 대한건축학회
9. 高坂清一, 'フレハフ建築の構造計劃と設計 : PC板工法の手法' 鹿島出版會 昭和 51年