

P.C 대형판 부분구조의 비선형 거동에 관한 실험과 해석 비교연구

Study on the Correlation between Analysis and Experiment
for the Nonlinear Behavior of Large Panel Precast Concrete Subassemblage

° 김 성 호 *
Kim, Sung - Ho
이 한 선 **
Lee, Han - Seon
이 병 해 ***
Lee, Byung - Hai

요 약

접합부에서 급격한 불연속성을 가진 프리캐스트 콘크리트(P.C) 대형판 구조는 붕괴에 이르기까지의 구조적인 거동이 일체식 콘크리트 구조와 매우 상이하다. 또한 극심한 지진과 같은 횡하중이 작용할 경우 그 최대 붕괴하중과 붕괴형상을 파악하는 것은 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 2층 실물크기 P.C 시험체에 대한 정적 실험결과를 토대로 비선형 해석 전산 프로그램인 ANSR를 사용하여 P.C 구조물의 비선형 거동을 예측하고 실험에서 관찰할 수 없는 최종 붕괴시까지의 내부 응력의 분포 및 변화를 연구하였다.

ABSTRACT

Under external loads, large panel structures behave quite differently from monolithic wall structures, because of the distinct planes of weakness in the horizontal and vertical joints between panels. Study on the ultimate load and the failure mode of the large panel structures under extreme lateral loads is therefore important. The purpose of this study is to predict the nonlinear behavior of the structure using the general purpose nonlinear computer program 'ANSR' being based on the quasi-static test results of the large panel structure(full scale in two story) and to examine the distribution and change mode of the internal forces which can not be obtained in the test.

* 학생회원, 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정
** 정회원, 대한주택공사 주택연구소 선임연구원
*** 정회원, 한양대학교 공과대학 건축공학과 교수

1. 서론

실험에 의한 연구는 이상화 및 해석 과정에 수반되는 여러가지 가정 및 부정확성으로 인해 이론해석으로 얻을 수 없는 실제적인 자료를 제공하여 줄 수 있지만 반면에, 실험실 규모상의 제약이나 실험장치의 한계성 및 시간적, 경제적인 이유 등으로 인해 현실적으로 많은 제약을 가지고 있다. 또한 특별히 측정계가 부착된 부위의 힘과 변형은 알 수 있으나 구조물 전반에 흐르는 힘의 크기나 변형시의 힘의 재분배 등은 여전히 예측하기가 쉽지 않다. 따라서 이러한 실험의 약점을 보완하기 위해 실험결과를 토대로 한 전산해석의 필요성이 대두되게 된다. 이에 본 연구에서는 국내에서 건설되고 있는 한 조립식 아파트의 2층 실물크기 부분 구조물(Sub-assembly)의 시험체를 대상으로 하여 비선형 해석을 시도하고, 모델링 및 해석 기법에 대한 신뢰성을 실험 결과와 직접적으로 비교, 검토하여 확인하고 있다. 이어서, 실험 결과와 양호한 일치율을 보이고 있는 해석 결과를 가지고 실험에서 확실하게 밝히기 힘든 P.C 구조물의 붕괴에 이르기까지의 역학적 메카니즘을 설명하고자 한다.

2. 실험

2-1. 시험체 개요

시험체는 국내 A사의 저층 아파트에 사용되고 있는 대형 피씨(P.C)판넬구조(6층)로서 대부분의 부재가 단순지지 또는 힌지로 되어 있으며 전체적인 구조의 안정성은 접합부 상호간의 물림작용과 부재간의 격막작용에 의해서 유지되는 구조 시스템이다.

벽 및 바닥 판넬의 두께는 12cm 이며 그 구조는 「그림 1-1, 과 같이 전단벽의 배근도는 그림 1-2, 와 같다.

2-2. 접합부의 공법

- 1) 수평 접합부 : 건식 공법으로 하부 판넬의 $\phi 16$ 후크철근을 상부 벽 판넬에 매립되어

있는 플레이트에 용접한 후 그라우팅 몰탈을 충전하는 공법이다. (「그림 1-3, 참조)

- 2) 수직 접합부 : 습식공법으로 하나의 판넬에 4개의 전단 코터(Shear Cotter)가 있고 D16 철근을 용접한후 그라우팅 본크리트를 타설하는 공법이다. (「그림 1-4, 참조)

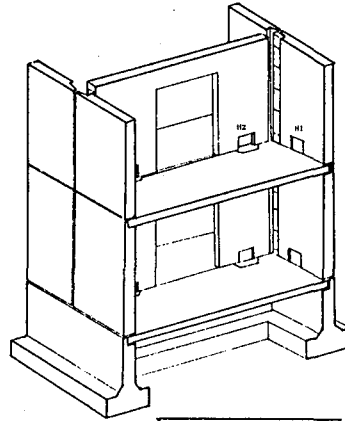


그림 1-1

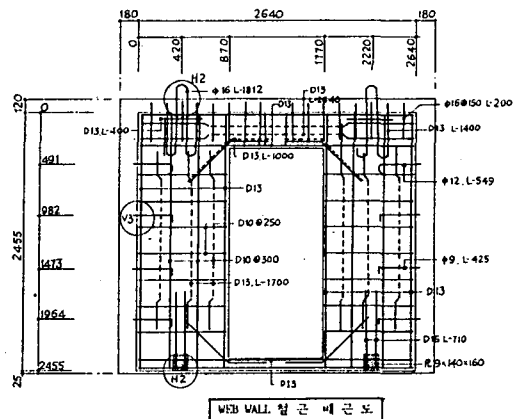


그림 1-2

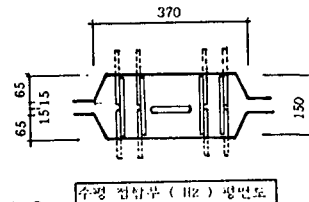
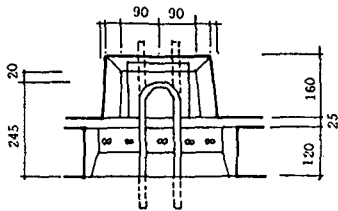
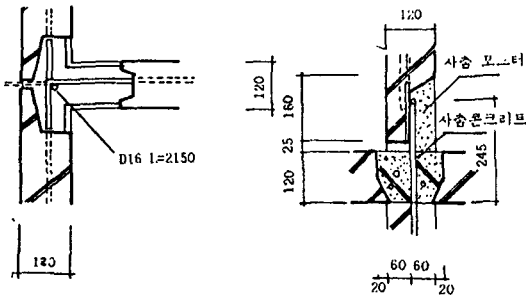


그림 1-3



수평 접합부 (HZ) 단면도



수직 접합부 단면도

그림 1-4 수평접합부 단면도

2-3. 사용 재료

판넬 및 접합부에 사용된 재료는 다음과 같다.

1) 콘크리트

P.C 판 및 접합부 그라우트의 압축강도 :

$$F_c = 240 \text{ KG/CM}^2$$

2) 철근

P.C 판 $F_y = 3000 \text{ KG/CM}^2$

접합부 HOOK $F_y = 3500 \text{ KG/CM}^2$

2-4. 실험 방법 및 결과

1) 2층 벽판넬의 상부에 원강성이 매우 강한 가력보를 설치하고 시험체 상단과 강접시킨 다음 한 방향으로 가력하였다. 이때 2층 벽판넬 개구부 상부에서의 응력 집중으로 인한 시험체 경계부분에서의 조기 파괴를 방지하기 위해 2층 벽판넬의 개구부 상부에 전단 보강을 하였다.

2) 실험 결과 균열의 최초 발생부위는 1층 수평 접합부 및 개구부 상부 모서리 부분이었으며 최종 붕괴시의 주요 파괴 형상은 개구부 상부 린넨보의 전단 파괴였다. 접합부 상부에

서의 미끄러짐 및 틈 변형은 2층 부분보다 1층 부분에서 심하게 나타났다.

3. 대형판 구조의 비선형 해석

3-1. 개요

비선형 거동은 구조물의 하중과 변형과의 관계가 비선형인 관계로서 일반적으로 기하학적 비선형형과 재료적 비선형이 있다. 재료적인 비선형은 재료의 응력과 변형률의 관계가 비선형인 경우로서 대형판 콘크리트 구조물의 거동은 판넬에 대한 접합부의 구조적인 취약성이 비선형 거동의 주요인이다. 실험결과에 의하면 파괴시의 횡치짐움(2층 상부의 횡치짐 / 시험체 높이)이 1%를 약간 상회함으로 기하학적 비선형의 영향은 거의 무시할 수 있다고 보고 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3-2. 비선형 해석 기법

해석 기법은 여러가지가 있으나 일반적으로 뉴우튼-랩슨(Newton-Raphson)법과 수정 뉴우튼-랩슨(Modified Newton-Raphson)법이 가장 많이 사용되고 있다. 뉴우튼-랩슨법은 수렴이 매우 빨리되는 대신에 강성 매트릭스를 매번 다시 계산하여야 하며, 수정 뉴우튼법은 초기 강성매트릭스를 계속 사용하나 수렴이 늦게 되는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 수렴성이 좋은 뉴우튼-랩슨법을 사용했다. (「그림 2-1」참조)

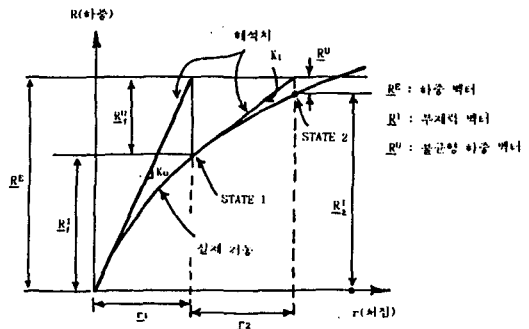


그림 2-1 뉴우튼-랩슨 반복법

4. 전산 해석 모델

4-1. 해석 모델의 구성

해석 모델의 구성을 위한 가정은 다음과 같다.

- 1) 벽은 2차원 부재이고 하중은 그 면내에 존재한다.
- 2) 접합부에서의 변형 형상(Mode)은 미끄러짐(sliding), 벌어짐(gap opening), 그리고 접합부의 파쇄(Crushing)를 고려한다.
- 3) 재료만의 비선형을 고려한다.
- 4) 구조체의 질량은 몇몇 점점에 고르게 집중(lumped)시킨다.

4-2. 벽 판넬의 모델링

1) 웹 벽 판넬

벽 판넬은 하나의 요소에 4-5개의 절점을 갖는 등질, 등방성, 탄소성 2차원 사각형 유한요소로 모델링을 했다. 하나의 유한 요소는 4개의 가우스 절점을 가지며 각 가우스 절점에서의 유효응력, σ_{eff} , 은 다음과 같이 정의되었다. (1)

$$\sigma_{eff} = \sqrt{1.5 (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2\tau_{xy}^2)} \quad (1)$$

이 유효응력이 일정한 항복응력, σ_y , 에 도달하면 본-미세스(Von-Mises) 항복조건에 의해서 탄성역에서 소성역으로 이전되는 것으로 가정하였다.

2) 플랜지 벽 판넬

구조물을 2차원으로 모델링하였기 때문에 웹 벽 판넬의 양쪽에 있는 플랜지 벽 판넬은 상하 수직으로 서있는 탄성 기둥으로서 모델링 하였다.

4-3. 접합부의 모델

1) 수평 접합부

가) 후크 철근

접합부를 가로지르는 후크 철근은 접합부의 열림(Gap Opening)과 닫힘(Gap Closing)에만 저항할 수 있는 탄소성(Elastic-

Perfectly Plastic) 비선형 스프링으로 이상화 했고 단면적과 항복응력, 탄성계수는 철근

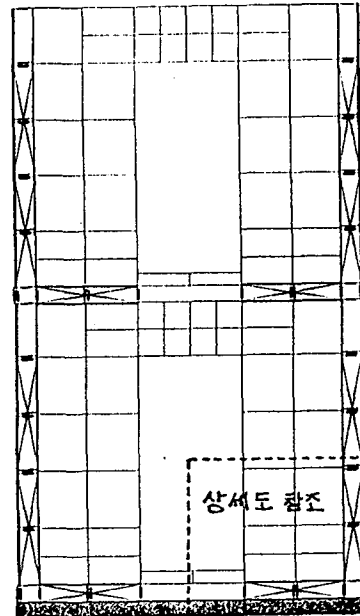


그림 3-1 해석 모델

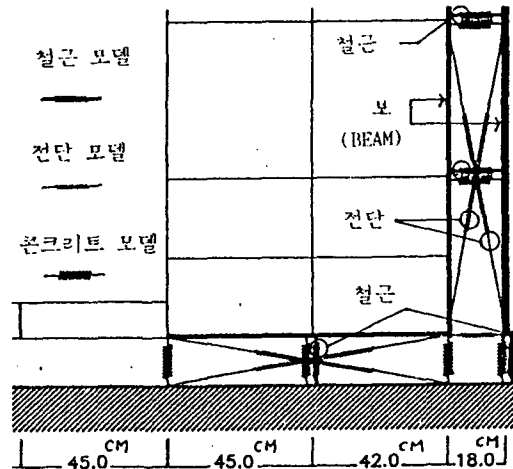


그림 3-2 해석 모델 상세도

의 그것을 그대로 사용했다. (그림 3-3, 참조)

나) 접합부 그라우트(콘크리트 또는 몰탈)

접합부의 압축력에 대한 저항은 접합부의 최대 내력이 그라우트의 파괴로 결정된다고 가정하고 압축력에만(Compression only) 저항할 수 있는 6개의 탄소성 비선형 스프링

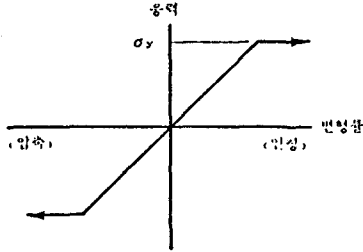


그림 3-3 **철근의 이상화 모델**

(Elastic-Perfectly Plastic)을 설치했다. 접합부의 최대 내력은 다음의 (2)식을 사용했다. (2)

$$P_{max} = (f_c'(\text{grout}) t_g L) / K \text{ -----(2)}$$

$$K = 0.4 \ln (11.2 t_g/t + 1)$$

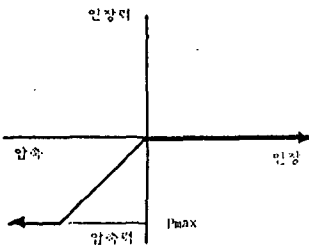
$f_c'(\text{grout})$: 그라우트의 압축강도

t : 벽체의 두께

t_g : 그라우트의 폭

L : 그라우트의 벽체방향 길이

스프링의 단면적은 그라우트의 폭에 해당 길이를 곱한 값을, 항복응력은 접합부의 최대 내력을 단면적으로 나누어서 결정하고 탄성계수는 이미 주어진 실험결과와 하중-변위 관계도를 참조하여 2장에서 언급한 실험 결과에 가장 수렴하는 값으로 가정하였다. (「그림 3-4, 참조」)



접합부 콘크리트의 이상화 모델

그림 3-4

다) 접합부의 전단 저항

본 연구에서는 상하 벽판넬을 X-자 형으로 연결하는 탄소성(Elastic plastic) 비선형 스프링으로 이상화 했고 접합부의 종국 전단강도에서 항복하도록 모델링 했다.

수평 접합부를 통한 전단력의 전달은 다음과 같은 작용을 통해서 이루어 지게 된다.

1. 접합부의 몰탈 부착력
2. 수직하중으로 인한 접합면의 마찰력
3. 접합면에 수직으로 배근된 철근으로 인한 전단 마찰(Shear Friction) 및 장부 작용(Dowel Action)

그러나 수평 접합부의 몰탈 채우기는 시공상의 어려움 및 수축작용 등으로 인하여 몰탈에 대한 부착력은 무시하고 수직하중에서의 전단 마찰과 수직 후크 또는 철근의 효과만 고려하여 그 항복 전단 내력을 다음 (3)식과 같이 결정하였다. (3)

$$F_s = \mu (A_s f_y + N) \text{ -----(3)}$$

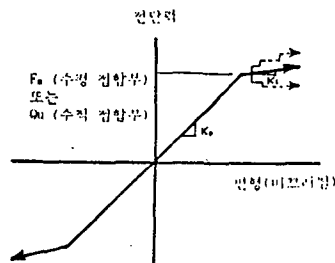
μ : 마찰계수

A_s : 철근 단면적

f_y : 철근의 전단 항복 강도

N : 자중으로 인한 압축력

여기서 마찰계수는 접합부의 공법이나 접합면의 크기 및 상태에 따라 다르게 되는데 본 논문에서는 1.0을 적용했다. (「그림 3-5, 참조」)



접합부의 전단 이상화 모델

그림 3-5

2) 수직 접합부

: 수평접합부와 같은 방법으로 이상화 했으나 전단 스프링을 모델링할 때 전단코타의 저항을 고려한 종국 전단내력을 계산하여 접합부가 종국 전단력을 받을때 항복하도록 모델링 했다. 접합부의 종국 전단 내력은 다음 (4)

식과 같은 K.Hansen의 식을 이용하였다.(4)

$$Q_u = 0.09 n a_k f_{ck} \text{-----}(4)$$

단, $0.01 < \eta < 0.08$, $f_y < 6000 \text{ kg/cm}^2$

$$0.2 < n a_k / A < 0.5, \quad h/d < 8$$

$$\eta = A_s f_y / f_{ck} \cdot A_c$$

A_c : 접합부의 단면적

n : 전단코타의 수

a_k : 전단코타 1개의 단면적

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도

f_y : 철근의 항복응력

윗 식은 전단코타만의 전단내력이므로 이 값에 철근의 장부작용도 고려하였다. (그림 3-5, 참조)

5. 실험 결과와 전산해석 결과와의 비교 분석

5-1. 전체적인 거동의 비교

실험결과와 해석 결과의 거동이 대체적으로 잘 일치하고 있으나 해석결과가 실험결과에 비해 구조체의 종국강도가 낮게 나타났으며 또한, 초기 강성도 낮게 나타났다. 그 이유의 일부로서 각 부분 요소의 이상화 단계에서 탄성계수의 설정을 정확히 할 수 없었으며, ANSR에서는 2개의 직선으로 이루어진 비선형모델(Bilinear Model)만이 가능하기 때문에 복잡한 접합부의 거동을

그림 4-1 하중-횡변위 관계도 (2층 개구부 중앙 상부)

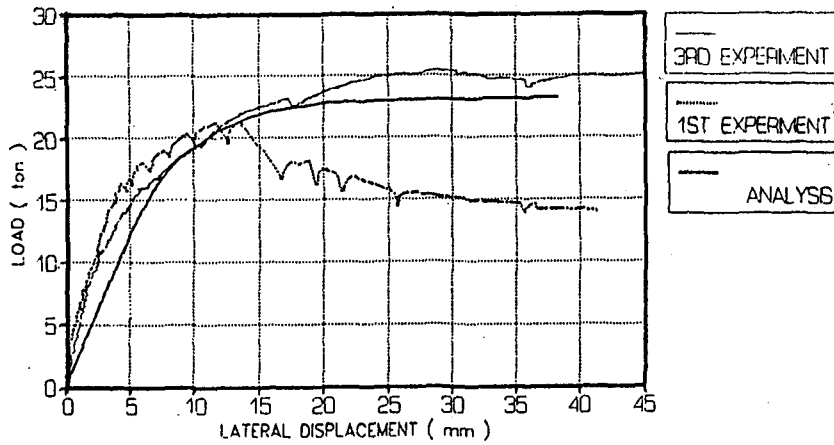


그림 4-2 하중-벌어짐 관계도 (1층 수평접합부 좌단)

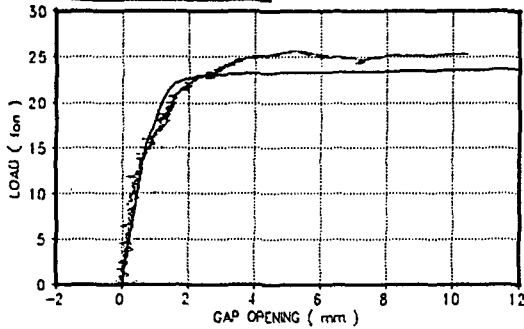
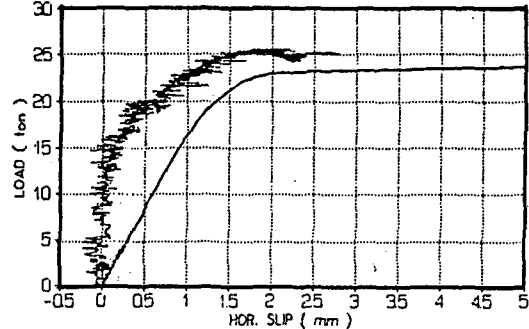


그림 4-3 하중-미끄러짐 관계도 (1층 수평 접합부)



정확히 이상화 할 수 없었다는 것을 들 수 있다.
(「그림 4-1 참조」)

5-2. 국부적인 거동의 비교

1) 수평 접합부

가) 접합부의 벌어짐 (Gap Opening)

1층 수평접합부의 벌어짐은 잘 일치하고 있으나 2층 수평접합부의 벌어짐은 구조체의 항복시점에서 잘 일치하지 않고 있으며 또한 초기 강성이 해석모델의 경우 조금 약한 것으로 나타났다.

나) 접합부의 미끄러짐 변형 (Shear Slip)

2층 접합부의 변형은 실험결과와 잘 일치하고 있으나 1층 접합부의 결과는 실험 결과에 비해 초기 변형이 점진적으로 진행되고 있다.

2) 수직 접합부

가) 접합부의 미끄러짐 변형

실험 결과는 초기 변형이 전혀 없으며 이는 초기 수직 전단력이 전단코타의 강도에 미치지 못했기 때문으로 여겨진다. 해석 결과에서는 변형이 점차로 진행되고 있으며 따라서 전단 요소의 이상화시 Rigid Plastic으로 이상화해야 할 필요가 있다고 여겨진다.

그림 4-4 부재력 - 변형 관계도
(1층 좌측 수직접합부의 전단변형)

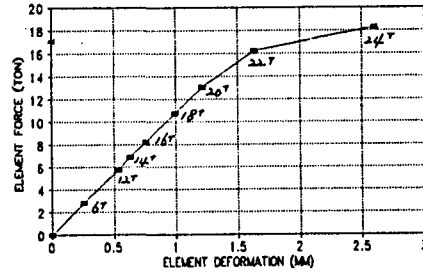
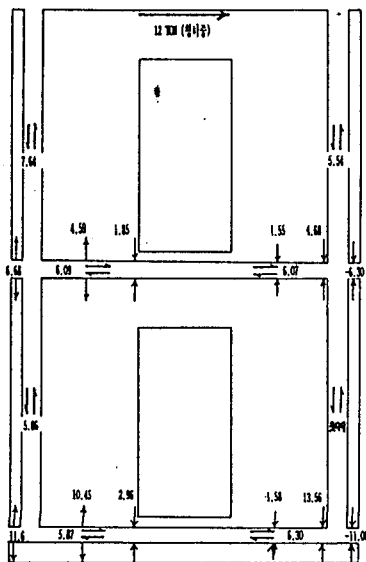
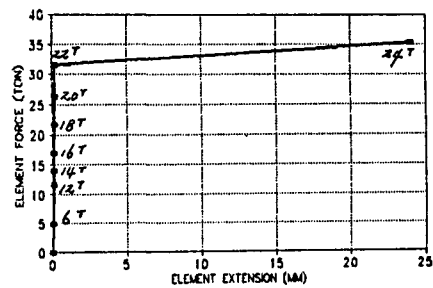
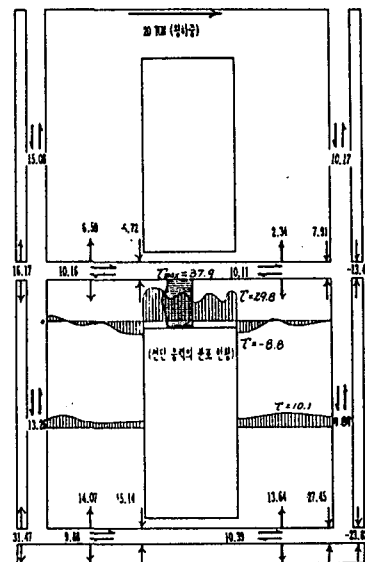


그림 4-5 부재력 - 변형 관계도
(1층 좌측 플랜지 벽의 수평접합부 HOOK 철근)



— (항하중 작용시의 힘의 분배 상황) -12 TON
(단, 좌측 전단 스프링의 취향은 고려되지 않음)

그림 5-1



— (항하중 작용시의 힘의 분배 상황) -20 TON
(단, 좌측 전단 스프링의 취향은 고려되지 않음)

그림 5-2

5-3. 역학적 힘의 전달 및 재분배

거의 탄성 상태에 있는 횡하중 12본인 경우와 완전한 소성단계에 있는 20본의 경우에 있어서의 내부힘의 분배상황은 「그림 5-1, 과 「그림 5-2,와 같다.

이 그림을 참조하여 힘의 전달 및 재분배상황을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 개구부 우측하부 수평 접합부의 후크철근은 초기에는 압축력을 받다가 개구부 상부의 벽이 파괴되면서 인장력을 받고 따라서 개구부 좌우측의 벽판넬이 별개의 판넬처럼 거동하게 된다. (강체 회전)
- 2) 수직 접합부의 전단력은 인장축(그림의 좌축)에서 더 많이 부담한다.
- 3) 수평 접합부의 하부 벽판넬로의 전단력의 전달은 인장축(그림의 좌축)보다 압축축에서 더 많이 전달한다.
- 4) 웨브 벽판넬 수평 접합부와 플랜지 벽판넬 수평접합부의 수직력에 대한 부담은 압축력은 거의 비슷하게 부담하나 인장력은 거의 2 배 이상으로 플랜지 벽(후크철근)이 부담하는 것을 알 수 있다.
- 5) 상당한 전단 응력의 집중이 개구부 상부에서 이루어 진다.

6. 결론 및 향후보완사항

6-1. 결론

실험을 통해서 얻기 힘들었던 전산해석의 결론은 다음과 같다.

- 1) 수평 접합부의 인장력에 대한 저항은 주로 플랜지벽이 부담한다.
- 2) 수평 접합부의 가력 반대쪽의 후크철근은 초기 탄성구간에서는 압축력을 받다가 판넬의 파괴와 더불어 인장을 받게 된다.
- 3) 수직 접합부의 전단력에 대한 부담은 인장을 받는 축에서 더 많이 부담한다.

6-2 향후 보완사항

- 1) 전산 프로그램 ANSR의 제약점 - 항복 조건은 본-미제스 항복조건만이 가능하고 요소의 비선형성에 대한 이상화도 Bilinear만이 되나 접합부의 좀더 정확한 이상화물 위해 이러한 제약조건들의 개선이 필요하다.
- 2) 접합부의 강성에 대한 실험연구의 보완이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 대한 주택공사 주택연구소의 'PC 아파트 내진설계 기준 제정을 위한 실험연구'의 일환으로 수행된 연구의 일부이며, 전산 시스템은 한양대학교의 VMS/VAX 8700 을 사용하여 해석하였다. 이 연구를 지원해 주신 관계제위께 심심한 감사를 표하는 바이다.

참고 문헌

- (1) Digambar P. Mondkar, Graham H. Powell, "ANSR 1, General Purpose Computer Program for Analysis of Nonlinear Structural Response", U.C. Berkeley, EERC Report No. 75-37
- (2) 이성원, "대형판구조의 수평접합부 내력에 관한 연구", 한양대학교 대학원, 1987.6.
- (3) M.G. Oliva, R.W. Clough, "Shaking table tests of Large-Panel Precast Concrete Building System Assemblages", U.C. Berkeley, EERC Report No. 83/14
- (4) 방한웅, "대형콘크리트 판넬구조의 접합부 거동에 관한 연구", 한양대학교 대학원, 1990.6
- (5) Vahid Schricker, Graham H. Powell, "Inelastic Seismic Analysis of Large Panel Buildings", U.C. Berkeley, EERC Report No. 80-38