

부착된 프리스트레스 넓은 보-기둥 외부접합부의 유한요소해석

FE Analysis of Exterior Wide Beam-Column Connections with Bonded Tendon Stress

이 문 성* 최 윤 철* 임 재 형** 문 정 호*** 최 창 식****
Lee, Moon-Sung Choi, Yun-Cheul Lim, Jae-Hyung Moon, Jeong-Ho Choi, Chang-Sick
(논문접수일 : 2007년 10월 12일 ; 심사종료일 : 2008년 6월 2일)

요 지

PPS(Post-tensioned Precast concrete System)공법은 U자형 PC로 제작된 넓은 보와 PC또는 현장 타설 콘크리트로 제작한 기둥으로 구성되며, PC보와 기둥의 일체성 확보를 위하여 프리스트레스를 도입하였다. 본 연구에서는 포스트텐션을 도입한 넓은 보-기둥 접합부의 구조적 특성을 규명하고, 다양한 변수해석이 가능하기 위한 자료를 제공하고자 유한요소해석 프로그램인 ANSYS을 사용하여 비선형 해석을 수행하였다. 콘크리트에 대한 해석요소는 8개의 절점을 가지며 각 절점이 3개의 자유도(X, Y, Z축에 대한 병진 변위)를 갖는 Solid 65요소를 사용하였다. Solid 65요소에서 전단전달계수(Shear-Transfer factor)는 실험값에 근사적으로 해석값을 맞추기 위한 영향 계수값으로 균열이 발생하는 위치에 대한 전단강도의 감소를 반영한다. 그 결과, 본 실험체에 대한 해석에서는 열려진 전단전달계수 0.125와 닫혀진 전달계수 0.85에 기초하여 해석한 결과 닫혀진 전단전달계수는 0.85에서 열려진 전단전달계수에서는 0.2일때 가장 실험값에 근사한 해석치를 보였다.

핵심용어 : PPS공법, 포스트텐션, 넓은 보, 골조기둥

Abstract

Post-tensioned precast concrete system (PPS) consists of U-shaped precast wide beams and concrete column. The continuity of beam-column joint is provided with the topping concrete on the PC shell beam and post-tensioning. Nonlinear analysis was conducted, using ANSYS, a finite-element analysis program, to obtain data for determining the characteristics of the structure and to allow various parametric analyses for post-tensioned wide beam-column connections. In this analysis, the Solid 65 element was used, in which concrete element had 8 nodes and each node had 3 degrees of freedom. Solid 65, the shear-transfer factor reflects a decrease of shear strength for the positions with cracks, as an impact factor to make the analysis value approximate the experiment value. In this study, the behavior of test specimens were most closely predicted to the experimental results, when the shear-transfer coefficient 0.85 was used for a closed crack, and 0.2 was used for an open crack.

Keywords : post-tensioned, precast, wide beam, beam-column connection, finite element analysis

1. 서 론

PPS(Post-tensioned Precast concrete System) 공법(삼성물산(주), 2003)이란 그림 1에 나타낸 바와 같이 기둥의 지판 위에 공장에서 제작한 깊이가 낮은 U형의 PC보를

걸친 후, Half PC슬래브 또는 Deck Plate 등을 설치하고 상부 철근의 배근과 덧침 콘크리트의 타설로 PC보와 기둥을 일체화시킨다. 그리고 구조체의 일체화 및 연직하중 저항을 위한 프리스트레스의 도입은 포스트텐션 방법을 사용하고, 유지관리에 용이하도록 프리스트레스 도입 후 쉬스관에 그라

* 책임저자, 정회원 · 한양대학교 BK21 박사후 연구원

Tel: 041-630-3298 ; Fax: 02-2281-2556

E-mail: 21ycchoi@chungwoon.ac.kr

* 교신저자, 정회원 · 청운대학교 건축설비소방학과 전임강사

** 우송공업대학 실내디자인과 교수

*** 한남대학교 건축공학과 교수

**** 한양대학교 건축공학과 교수

· 이 논문에 대한 토론을 2008년 10월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2008년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

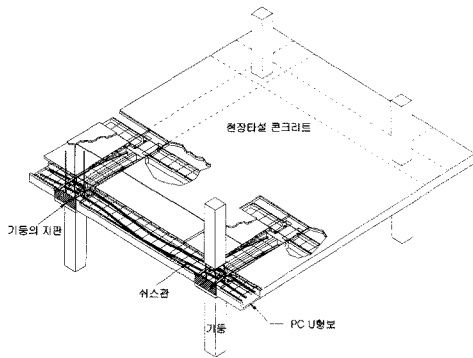


그림 1 PPS공법의 구성

우트를 주입하여 부착된 긴장재를 갖는 보로 형성한 구조시스템이다. PPS공법의 장점은 긴 경간에 보의 깊이가 낮은 넓은 보를 사용할 수 있기 때문에 고층건물에서 층고의 감소 효과와 수직적 요소의 비용을 절감할 수 있다.

이전의 연구(최윤철 등, 2004; 2005)에서 새롭게 개발한 공법인 PPS공법에 대한 넓은 보-기둥 접합부 실험으로 구조적 거동 특성을 평가하였다. 그러나 새로운 공법에 대하여 접합부와 같은 특정부위를 대상으로 실시한 실험은 실험의 제약으로 인하여 다양한 변수에 대하여 다소 한계가 있으며, 하중 증가에 따른 응력흐름이나 변화를 파악하지 못하고 있을 뿐 아니라, 파악한다고 하여도 측정위치의 한계는 분석에 신뢰할 만한 자료를 제공하지 못하고 있는 실정이다.

또한 구조물의 설계시 작용하는 사용하중 상태는 최대강도 이전의 단계이기 때문에 하중 변화에 따른 메카니즘의 흐름을 정확히 파악할 필요가 있다. 이러한 측면에서 볼 때 실험에 근거한 해석적 연구는 실험에서 규명하기 어려운 문제를 해결하고 실험적 제약으로 인하여 다양한 변수와 관련한 분석이 어려울때 꼭 필요한 연구라 할 수 있다.

본 연구의 대상은 국내의 건설현장에서 최대한의 실용성을 발휘할 수 있도록 개발된 PC U형 단면을 사용한 넓은 보-기둥 접합부이다. 본 논문에서는 기존 실험자료를 바탕으로 새로운 접합부 상세를 가지는 PPS공법의 접합부 거동에 대하여 실험에서 실시하지 않은 주요변수의 영향을 파악하고자 ANSYS 프로그램을 이용하여 유한요소해석을 실시하였으며, 각각의 요소들이 전체거동에 기여하는 정도를 파악하고자 하였다.

본 연구에서는 기존 실험결과와 비교분석을 통하여 PS를 도입한 넓은 보-기둥 접합부의 해석방법을 제안하였으며, 그 결과를 토대로 프리스트레스 콘크리트 구조의 주요 제한 요소인 콘크리트 강도의 변화에 따른 거동을 비교하였다. 또한 새로운 접합부에서 PS의 기여정도를 파악하고자 긴장재를 철근으로 대체하여 해석을 실시함으로써 추후 다양한 변수해석이 가능하기 위한 자료를 제공하고자 한다.

2. 기존연구

국내의 경우 임재형 등(1997)은 극한상태에 있는 프리스트레스 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 응력을 평가하고자 유효프리스트레스, 콘크리트 강도, 긴장재의 양을 주요 변수로 하여 유한요소법을 이용한 비선형 해석을 수행하였다. 그 결과 콘크리트의 강도와 긴장재의 양에 따른 변수해석에서 콘크리트의 강도가 증가할 때도 극한상태에서 긴장재의 응력은 계속적으로 증가하며, 긴장재의 양이 증가할 때 긴장재의 응력은 감소한다고 보고하고 있다.

Stehle 등(2001)은 넓은 보의 너비비를 완하시키자는 기존 연구자들의 제안은 소요강도보다 요구되는 변위에 더 초점을 맞춘것으로써 전단균열 및 비틀림은 고려하지 않은 것이라 보고하고, 넓은 보의 주근에 Debonding방식을 채택한 실험체의 실험결과를 바탕으로 ANSYS를 이용하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 부착이 제거된 철근은 연속된 철근으로 모델화 하였으며, 그 결과 실험에서 나타난 균열양상과 유사하였다. 또한 전단전달계수가 0.1이라는 이전 연구와는 달리 0.125를 제안하였다.

Hegger 등(2004)은 일체식으로 이루어진 철근콘크리트 보-기둥 접합부에 대하여 비탄성 거동을 평가하기 위하여 기둥의 철근비, 콘크리트 압축강도, 보 철근의 정착방법 등을 주요 변수로 하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과 내, 외부의 접합부 형태에 따라 다르게 거동하고 있으며, 접합부의 전단강도등 거동에 영향을 미치는 주요변수는 콘크리트의 압축강도임을 밝히고 있다.

그러나 이상의 유한요소 해석과 관련한 연구들은 주로 일반적인 형태의 보-기둥 접합부이거나, 프리스트레스와 관련한 해석모델은 비부착상태로 한정되어 있으며 부착방식의 포스트텐션된 넓은 보-기둥 접합부의 유한요소해석에 대한 연구는 미미한 실정이다.

3. 해석모델의 요소

3.1 콘크리트

콘크리트에 대한 해석요소는 8개의 절점을 가지며 각 절점은 3개의 자유도(X, Y, Z축에 대한 병진 변위)를 갖는 Solid 65요소를 사용하였고, 콘크리트의 물성은 재료시험으로부터 얻은 값을 사용하였다.

다축응력 상태에서 콘크리트의 파괴기준은 Willam과 Warnk의 5변수(일축 인장강도, 일축 압축강도, 이축 압축강도, 정수응력상태에서의 이축 압축강도, 정수응력상태에서의 일축 압축강도) 모델을 사용하였다. 파괴면은 σ_{xp} , σ_{yp} ,

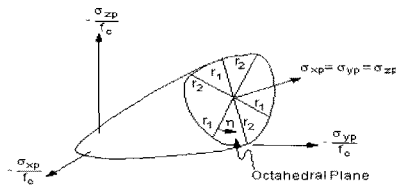


그림 2 주응력 공간에서의 파괴면

σ_{zp} 등의 주응력으로 표현하면 그림 2와 같다.

인장을 받는 콘크리트는 균열이 발생하게 되는데, 균열면에서의 하중전달은 전단전달계수를 이용한다. 균열이 열렸을 때와 닫혔을 때의 계수를 이용하여 전단을 전달하도록 조절한다.

Klein, D. G.(1986)는 슬래브 해석에서 열려진 균열의 전단전달계수를 0.1로 제한하였고, 최근 John, S. S.(2001)의 내부 넓은 보-기둥 접합부에서는 0.125로 하고 있다. 본 연구에서는 부착방식을 고려하고 열려진 전단전달계수 0.125와 닫혀진 전달계수 0.85에 기초하여 해석한 결과, 닫혀진 전달전달계수는 0.85에서 열려진 전단전달계수는 0.2일때 가장 실험값에 근사한 해석결과를 보였다. 이러한 전단전달계수의 수정치는 프리스트레스트력이 작용하기 때문에 골재의 맞물림이 작용이 확대되고, 보 부재의 주응력의 각도가 45°보다 작아져 전단달근이 더 많이 걸려지기 때문에 전단강도의 상승이 반영된 것으로 판단된다.

3.2 긴장재(tendon)과 철근

철근은 콘크리트 내에 분포되어 콘크리트의 균열이후 부재의 인장응력을 부담하며, 이에 대한 비선형 재료 특성은 Bi-Linear모델을 이용하였다. 또한 압축과 인장에 대하여 완전탄소성으로 가정함으로써 항복응력은 대상 실험에서의 재료 시험값을 사용하였고, 항복 후에는 변형경화율을 초기강성의 0.01로 가정하였다.

콘크리트 구조물에 프리스트레싱 효과를 도입하는 기법에는 콘크리트 요소의 텐던 세그먼트에 등가절점하중을 발생시키는 초기응력법과 프리스트레싱 텐던의 효과를 외력으로 치환하는 등가하중법이 있다. 초기응력법은 하나의 텐던 세그먼트에 대한 단면적 A_b 에 프리스트레스 σ_b 가 작용할 때 콘크리트 요소에 발생하는 등가절점하중 벡터 P_b 는 다음과 같다.

$$P_b = A_b \int_{l_p} B_b^T \sigma_b dl \quad (1)$$

등가하중법은 텐던의 곡률에 따라 발생하는 등가분포하중 (P)과 텐던이 꺾인 곳이나 텐던의 끝(정착부)에서 발생하는 등가집중하중 (P_c)으로 나눌 수가 있다. 등가분포하중은 텐

던 축에 직각방향으로 작용하며 텐던 미소요소의 힘의 평형으로부터 그 크기가 $p_n = P/R$ 로 유도되며, P 는 프리스트레싱 힘, R 은 곡률반경이다. 또한 등가집중하중은 텐던이 꺾인 곳의 경우 힘의 평형에서 구할 수 있고, 텐던의 끝의 경우 프리스트레싱 힘만큼 집선방향으로 작용하는 하중으로서 초기응력법과 비교할때 텐던에 의해 구조물에 작용하는 힘의 분포를 한눈에 명확히 파악할 수는 장점이 있다.

본 연구에서는 각 절점의 변위 산출이 가능하고 기둥 코아내, 외부 정착비에 대한 변수를 반영할 수 있도록 discrete 모델을 사용하여 텐던의 기하형상에 맞추어 직선으로 근사화하여 모델링 한 등가분포하중과 등가집중하중을 병행한 등가하중법을 사용하여 해석을 실시하였다.

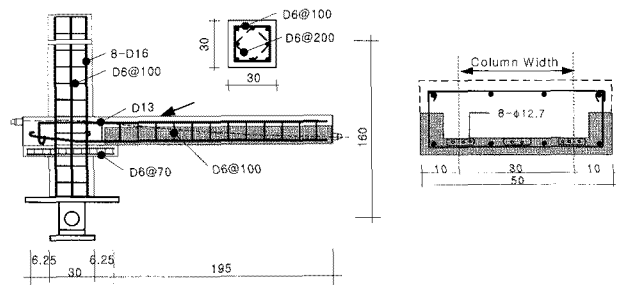
4. 넓은 보-기둥 접합부 해석

4.1 해석대상

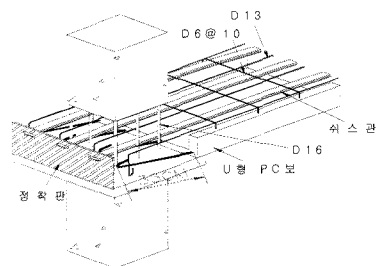
대상 실험체는 삼성물산(주)(2003)에 의해 개발된 PC U

표 1 실험체 일람

| 구분 | 보 | | 보/기둥 너비비 (b_w/b_c) | 기둥 코아 내부 정착비(%) |
|-------|--|-----------------|------------------------|-----------------|
| | 상부 | 긴 장 재 | | |
| EJH-1 | 4-D13 | 8- ϕ 6 | 1.67 | 64 |
| EJH-2 | ($F_y=427M$) | ($F_p=2100M$) | | 36 |
| EJH-3 | Pa) | Pa) | 2 | 64 |
| 공통 | 보 : 늑근 D6@100, 기둥 : 30×30cm, 주근 8-D16, 대근 D6@100 f_{ck} : 34.3MPa, 축력 : 309kN ($0.1 f_{ck} A_g$) | | | |



(a) 기준실험체의 단면 및 평면



(b) 접합부 상세

그림 3 실험체 상세

형 단면을 사용한 포스트텐션된 넓은 보-기둥 외부접합부 실험체를 대상모델로 선정하였다. 실험체별 주요변수는 기둥 코아 내부에서 철근과 간장재의 정착비로서 64%와 36%로 달리하였다. 또한 보/기둥 너비비를 현행 ACI 기준의 최대 너비비인 2.0과 1.67로 한 실험체를 해석대상으로 하였다. 실제 구조물에 대하여 1/2축소모델로 제작된 각 실험체에 대한 변수와 접합부 상세는 표 1과 그림 3과 같다.

4.2 대상모델링

넓은 보-기둥 접합부의 유한요소 해석을 위한 형상은 그림 4와 같다.

해석 모델의 경계조건은 하부 힌지 치구, 보의 더블 힌지, 가력점 액츄에이터 형상을 반영하여 원뿔 모양의 경계조건과 실험체 길이방향의 대칭성을 고려하여 모델링하였다. 또한 실험결과 넓은 보의 휨 파괴가 주요 파괴모드로 나타나 해석에서 이에 대한 고찰을 위하여 보와 접합부에서 요소망의 밀도를 조절하였다.

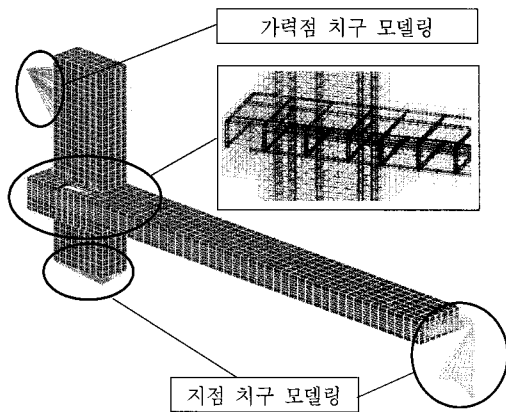


그림 4 접합부 모델링 형상

기둥의 축력과 보의 등가집중하중은 수렴시 하중 집중 문제를 감소시키기 위하여 분포하중으로 적용하여 첫 번째 하중단계에서 전부 작용시켰고, 두 번째 하중단계에서 실험체의 기둥 가력점과 같은 곳에 포인트 하중에 의하여 자동하중 제어 방식으로 가력하였다. 또한 실험결과에서 하중-변위곡선이 연성적 보의 파괴모드를 나타냈기 때문에 접합부의 극한 하중은 이전 하중 단계에서 나타난 총 변위의 50%를 초과하는 하중으로 선택하였다.

본 해석을 위한 대상실험체는 곡선형태의 PS를 도입한 것으로 긴장재의 형상을 층으로 근사화하여 모델링하였으며 고정하중의 50~60%정도를 부담하도록 프리스트레스를 도입하였다.

4.3 해석결과

4.3.1 하중-변위 관계

기둥의 가력지점에서 측정된 변위와 하중의 관계를 실험결과와 비교하여 표 2와 그림 5에 각각 나타내었다.

그림 5에서와 같이 모든 실험체에서 부재각(Drift Ratio) 2%까지 탄성적으로 거동하고 있으며, 초기강성은 약 5%가량의 오차범위 내에서 우수한 예측을 할 수 있었다. 또한 정가력(보가 있는 방향)에서 보다 부가력(보가 없는 방향)에서 다소 높은 내력을 발휘하고 있는데, 이는 실험체의 형상이 좌, 우 비대칭의 외부접합부를 대상으로 모델링하였기 때문에 인장철근의 기여정도와 텐던의 곡선 배치에 따라 내력의 크기가 다르게 나타남을 알 수 있다.

표 5에 나타난 해석결과 최대내력을 실험내력과 비교하면 해석모델이 실험결과의 약 90%이상 비교적 정확히 예측하고 있으며, 특히 정가력에서는 해석모델의 최대내력이 실험결과에 비해 약 8%정도 더 크게 나타나고 있는데, 이는 해석 모델링시 실험체에서 PC U형 보와 현장 타설 콘크리트의 접합부분에 대하여 부착정도를 완전히 고려할 수 없었기 때문에 판단된다.

변수별 해석결과를 살펴보면, 보/기둥 너비비를 달리한 EJH-1, 3의 경우 부가력에서는 유사하게 나타나고 있으나 정가력에서 보의 너비가 큰 EJH-3이 EJH-1에 비해 약 30%의 내력증가를 나타내고 있는데, 이는 단면증가에 따른 내력상승의 효과로 판단되며, 최대하중은 실험결과와 유사하게 나타나고 있다. 그러나 최대강도 이후 강도감소 효과는 해석상 표현되지 않고 파괴에 이르게 되고, 내력이 계속 증가되는 양상을 보이는데, 이는 해석의 방법상 철근 및 긴장재의 재료모델에 근거하여 항복이후 강도가 계속 증가하는 특성을 가지기 때문이다.

4.3.2 콘크리트 응력분포

Solid 65요소에서 균열은 세가지 형태의 균열로 나타나고 있는데 첫 번째 균열(first crack)은 힘을 가할 때 처음 균열이 생기는 것을 보여주며, 두 번째 균열(second crack)은 사전으로 생기는 균열이고, 세 번째 균열(third crack)은 철근을 따라 균열이 생기는 것을 보여준다.

그림 6은 EJH-1 실험체의 하중 단계별 균열의 발생위치를 나타낸 것으로 초기의 하중단계에서부터 하중이 증가하여 극한하중에 도달할 때까지 일정 간격의 수직 휨 균열이 보의 단부에서 시작하여 중앙부 쪽으로 발전하는 양상을 보이고 있으며, 이는 실험에서와 유사한 균열패턴을 나타내고 있다.

그림 7은 기준 실험체의 3차 균열이 발생한 하중에서부터

표 2 실험결과

| 실험체 | | $THE P_u$ (kN) | P_u (kN) | P_u (FE) (kN) | P_u / P_u (FE) |
|-------|-----|-------------------|---------------|--------------------|---------------------|
| EJH-1 | 정가력 | 27.4 | 34.9 | 38.5 | 0.91 |
| | 부가력 | 46.1 | 63.4 | 64 | 0.99 |
| EJH-2 | 정가력 | 27.4 | 35.2 | 40 | 0.88 |
| | 부가력 | 46.1 | 61.4 | 65 | 0.94 |
| EJH-3 | 정가력 | 38.2 | 49.8 | 48 | 1.03 |
| | 부가력 | 51.9 | 60.3 | 61.5 | 0.98 |

$THE P_u$: 최대하중(설계값) P_u : 최대하중(실험값)
 P_u (FE) : 최대하중(해석값)

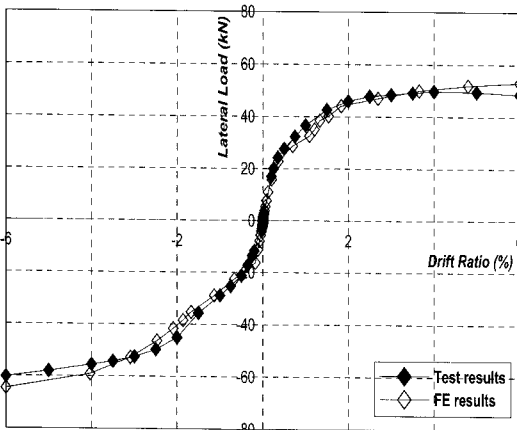
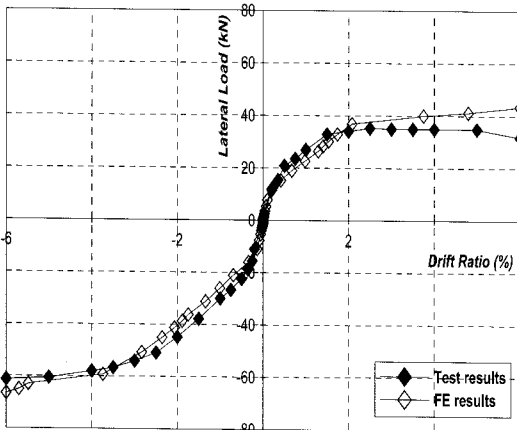
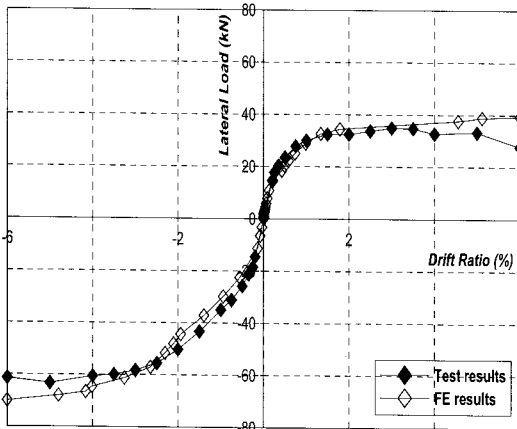
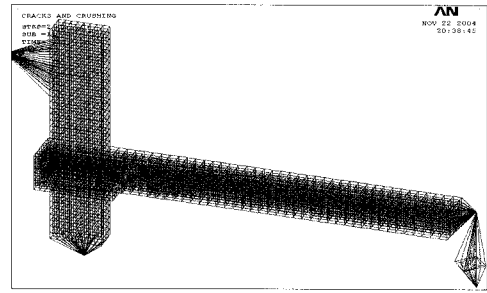
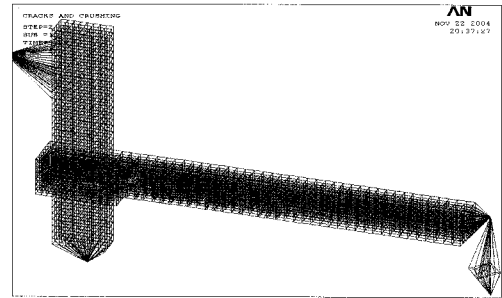


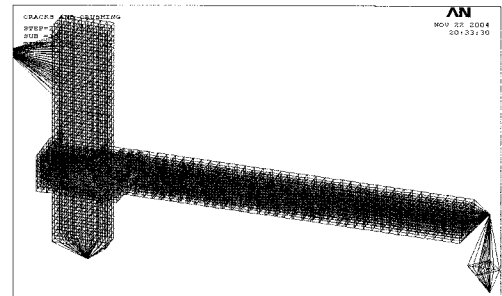
그림 5 하중-변위 곡선 비교



(a) 하중 5kN



(b) 하중 20kN

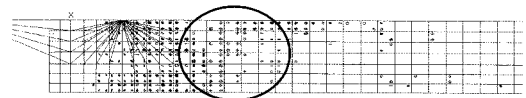


(c) 극한하중

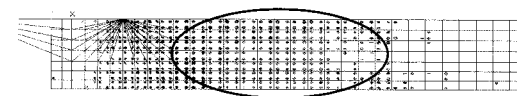
그림 6 EJH-1 실험체의 하중 단계별 균열



(a) 하중 17.6kN, 부재각 0.2%



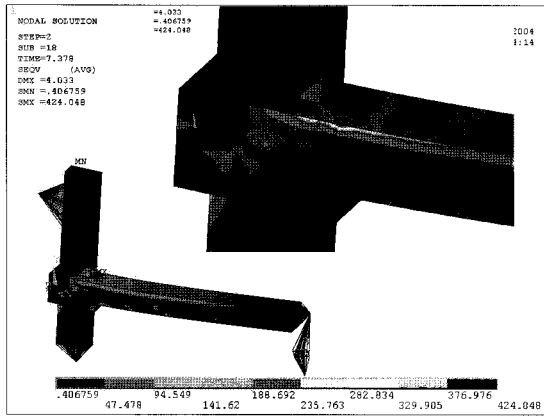
(b) 하중 27.6kN, 부재각 0.8%



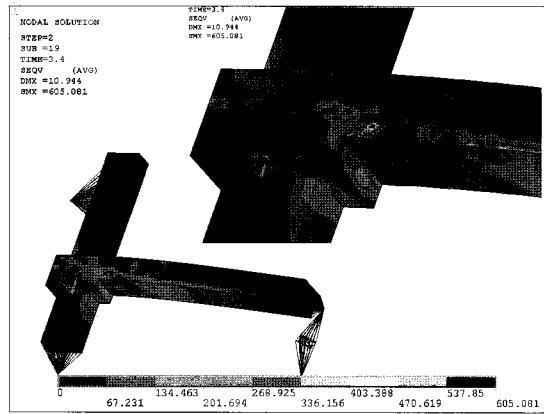
(c) 하중 38.55kN, 부재각 4.5%

그림 7 EJH-1 실험체의 하중단계별 3차 균열

하중이 증가함에 따라 3차 균열의 발전양상을 나타낸 것이다. 철근 주변의 균열인 3차 균열은 하부면의 PC조립면 주



(a) 정가력



(b) 부가력

그림 8 EJJ-1 실험체의 Von Mises 응력

위에서 발생하여 보의 단부로 확장하는 형태를 보였는데 이는 하중이 증가함에 따라 소성현지의 발생이 보의 중앙부로 이동하였기 때문으로 판단된다. 그러나 하중-변위 곡선에서와 마찬가지로 PC U형 보와 현장 타설 콘크리트 부분의 접합을 완전히 고려할 수 없는 이유로 실험결과와 비교할 때 강도면에서 약 10% 내·외의 차이가 있음을 알 수 있다.

그림 8은 EJJ-1 실험체의 최종 하중 단계에서 접합부에 나타난 콘크리트 von Mises 응력분포를 나타내고 있다. 실험에서 최대균열폭이 발생한 위치로서 해석모델에서 극단적인 형상변화를 나타내고 있는 드롭판넬 끝단과 PC U형 보의 조립부에서 콘크리트의 응력집중을 나타내고 있으며, 보-기둥 접합부에서는 비교적 작은 응력 분포를 나타내고 있다. 특히 정가력의 경우 기둥과 보의 접합면에서 콘크리트 부분의 압괴에 의한 응력분포를 나타내고 있다. 전체적인 응력분포는 보의 단부에서 시작하여 중앙부로 이동하는 휨 파괴 메카니즘을 나타내고 있으며, 변수별 해석결과 보의 폭이 60cm로 가장 큰 EJJ-3 실험체에서 가장 작은 응력분포를 나타내고 있다.

4.3.3 접합부 철근 변형

그림 9는 EJJ-2 실험체의 해석결과 각 부재각에 따라 보 상부철근에서 나타난 변형률이다. 일반적으로 기둥 코아 내부에 정착된 철근은 가력 초기부터 급격한 변형률의 증가를 나타내며 부재각 2~3%에 항복하였다. 그리고 부재각이 증가함에 따라 기둥 코아 외부의 모든 철근들도 항복하였다. 또한 보의 상부 철근 보다 하부 철근이 먼저 항복함을 알 수 있었는데, 이는 외부접합부를 대상 부재로 선정함으로써 반복가력 되는 동안 철근의 위치에 따라 인장응력을 부담하는 정도가 다르기 때문으로 판단된다. 그러나 부재각에 따른 변수별 보의 주근에 나타난 항복의 시기는 다소 차이가 있었는데 보의 너비를 달리한 EJJ-1, 3의 경우 기둥 코아 내·외부에서 부재각 2.5%에 항복한 EJJ-1 실험체가 다소 높은 변형률을 나타내었다. 그러나 보의 너비가 더 큰 EJJ-3의 경우에는 부재각 3.5%에 항복함으로써 다소 늦게 항복함을 알 수 있었다. 이는 보의 너비가 작을수록 기둥 코아 외부에서의 응력부담이 가중되었기 때문으로 판단된다. 또한 기둥 코아 내부의 정착비를 달리한 EJJ-1, 2의 경우에는 부재각 2% 내·외의 거의 유사한 시기에 항복함을 알 수 있었다. 그림 10은 실험결과에서 최종적인 소성현지의 이동위치

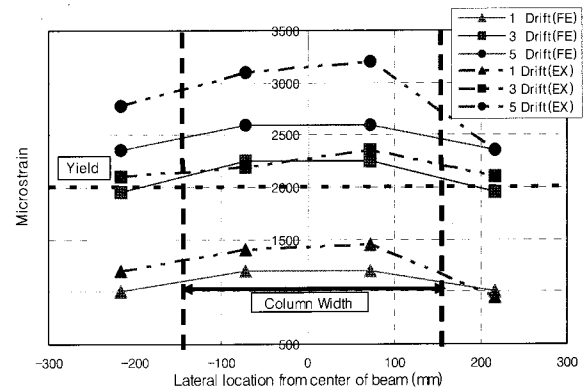


그림 9 EJJ-2실험체의 상부 주근 변형률

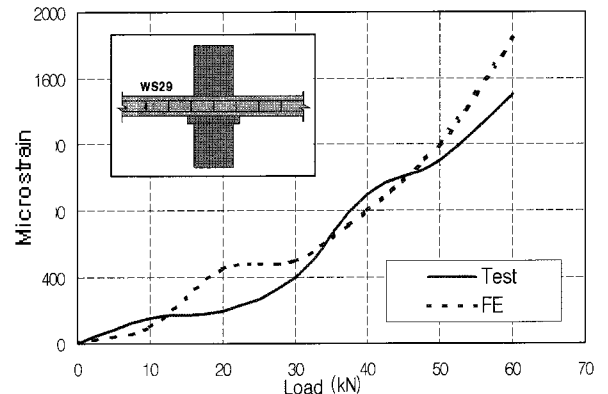


그림 10 EJJ-2실험체의 전단철근 변형률(기둥면에서 30cm)

로 나타난 EJH-2 실험체의 기둥면에서 30cm 위치한 보의 전단 철근 변형율을 나타낸 것으로 해석결과 다른 두 실험체에서도 이와 유사하게 가력 사이클 동안 항복 변형율을 넘지 않는 것으로 나타났다. 기둥 코아 외부의 정착비가 가장 커 다른 두 실험체에 비해 불균형 모멘트의 약 1.5배 정도 크게 나타난(최윤철 등, 2005) EJH-2가 다른 실험체에 비해 약간 큰 변형율을 보였다. 여기서 FE 1은 유한요소해석시 부재각 1%의 값을 의미한다.

현행 ACI기준(ACI, 2002)에서는 지진지역에서 항복이 예상되는 부위의 철근에 대한 횡적지지 역할을 위하여 부재의 깊이에 대하여 1/4로 제한하고 있으나 본 연구에서는 보다 완화된 1/2간격으로 전단철근을 배근하였지만 실험체에서 보의 사선균열은 거의 발생하지 않고 전단철근이 항복하지 않는 것으로 나타났다. 이는 기존의 보-기둥 접합부와는 달리 넓은 보의 경우 보에서 큰 콘크리트 단면적 영향을 잘 반영하고 있으며, 현행 기준에서의 전단철근의 간격은 넓은 보에 대해서 다소 완화하여 고려할 필요가 있는 것으로 사료된다.

5. 유한요소모델의 변수해석

위에서와 같이 PC U형 보에 프리스트레스를 도입한 넓은 보-기둥 접합부의 유한요소 모델은 실험결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 평가하였다. 따라서 기존연구를 통하여 외부 접합부의 거동에 영향을 미치는 요인으로 평가된 변수해석을 수행하였다.

5.1 콘크리트 강도

외부접합부의 접합부 전단강도와 최종파괴하중에 영향을 주는 주요변수는 콘크리트 강도이다(Josef 등, 2004). 따라

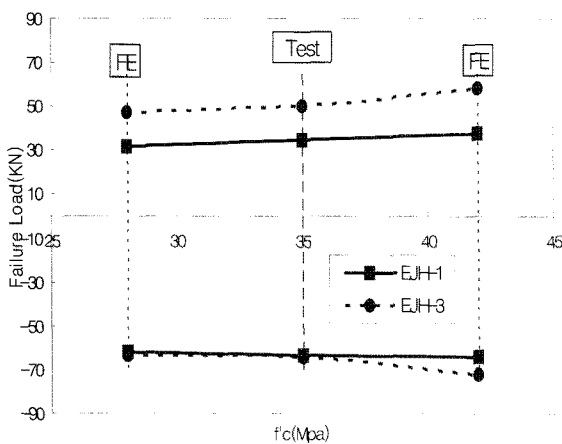


그림 11 콘크리트 강도 변화에 따른 최대내력

서 실험에서 너비비 변수를 가지는 실험체 EJH-1, EJH-3와 같은 제원에서 콘크리트 강도를 28MPa와 42MPa로 변화시켜 넓은 보/기둥의 너비비에 대하여 콘크리트 강도가 보-기둥 접합부 거동에 미치는 영향을 평가하고자 최대내력을 평가하였다. 그 결과 그림 11에서와 같이 정가력의 경우 보/기둥 너비비가 1.67인 경우 약 5%정도의 미미한 증가를 나타내었다. 반면 보/기둥의 너비비가 2.0인 경우 약 10%정도의 내력증가를 예측하였다. 또한 부가력의 경우 보/기둥 너비비에 관계없이 콘크리트 강도가 증가할수록 약 5%이하의 매우 미미한 증가를 나타내었다.

콘크리트 강도변화에 따른 최대내력을 비교한 결과 대체적으로 강도가 증가할수록 최대내력은 증가하는 경향을 나타내었으며, 인장철근의 기여정도가 높은 부가력보다 정가력에서 최대내력이 더 많은 증가량을 나타내고 있다. 이는 앞 절의 내력평가에서도 알 수 있듯이 보/기둥 너비비가 클때 최대내력은 콘크리트 강도가 높아짐에 따라 중립축의 상승효과가 크기 때문으로 판단된다.

5.2 긴장재의 철근변환

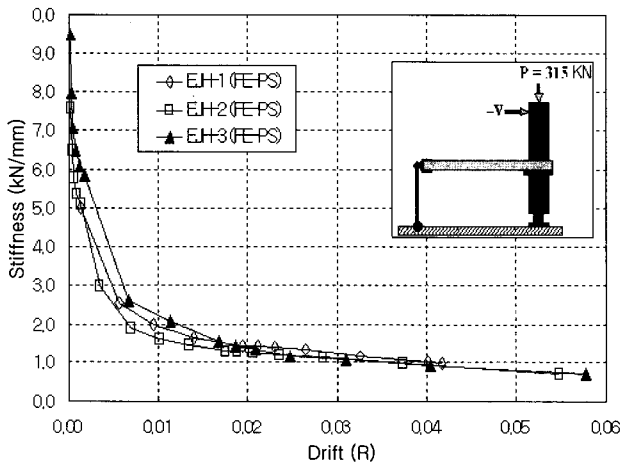
현행 기준에는 긴장재와 철근을 혼용하여 사용한 부분 프리스트레스 부재의 경우 일반 철근의 효과를 전혀 고려하고 있지 않다(임재형 등, 1997). 그러나 넓은 보-기둥 접합부의 경우 기둥 코아 내부에 정착된 긴장재의 양에 따라 다르게 거동하고 있음을 보고하고 있다(Hatamoto 등, 1991).

그림 12는 긴장재와 철근으로 달리 모델링하여 해석한 결과를 각 부재각에 대한 강성으로 나타내었다. 여기에서 강성은 최대변위점을 연결하는 기울기로 평가하였다. 그림에서와 같이 대체적으로 부재각 1%이내의 초기강성에서 많은 차이를 나타내고 있으며, 특히 기둥 코아 내부의 정착비가 높은 실험체에서 더 높은 초기강성을 나타내고 그중에서도 보의 너비가 가장 큰 EJH-3 실험체가 가장 높게 나타나고 있다.

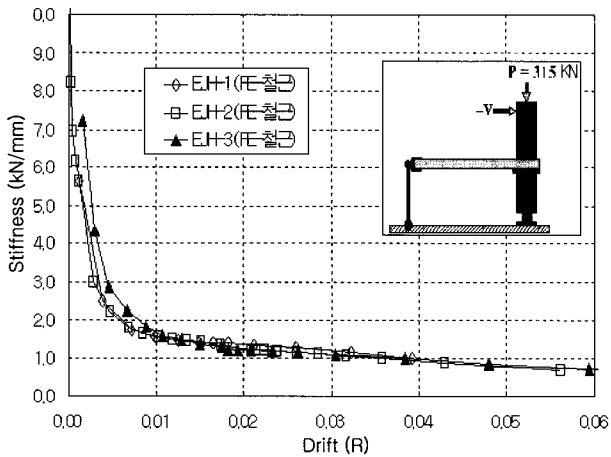
변수별 강성 저하율을 살펴보면, 철근 보다 넓은 보의 기둥 코아 내부에 긴장재를 부분 정착한 경우가 더 높은 강성값을 나타내고 있다.

그림 12(a)는 넓은 보의 기둥 코아 내부에 긴장재를 배치한 경우로 기둥 코아 내부의 정착비를 달리한 EJH-1, 2 실험체에서 부재각 1%이내의 초기강성에는 기둥 코아 내부의 정착비가 높은 EJH-1 실험체가 약 20%정도 높게 나타나고 있으며, 보/기둥 너비를 달리한 EJH-1, 3 실험체에서 보의 너비가 큰 EJH-3 실험체가 약 13%정도 높게 나타났다.

그림 12(b)는 넓은 보의 기둥 코아 내부에 긴장재 대신 철근을 배근한 경우로 너비비를 변화시킨 EJH-1, 3 실험체



(a) 긴장재 배치



(b) 철근 배치

그림 12 변수별 해석 결과에 따른 강성변화

에서 부재각 1%이내의 초기강성은 보의 너비가 큰 E.JH-3 실험체가 약 15%정도 높게 나타나고 있는 반면 정착비를 달리한 E.JH-1, 2 실험체에서는 거의 동일한 강성값을 나타내었다. 따라서 넓은 보-기둥 접합부에서 유효 철근으로 간주하고 있는 기둥 코어 내부의 경우 철근 보다 철근과 긴장재를 혼용한 부분 프리스트레스 부재가 더 높은 초기강성을 나타내고 있으며, 특히 기둥 코어 내부의 정착비에서 보다 현행 ACI 기준에서 제한하고 있는 보/기둥 너비비 내에서 보의 크기에 비례하여 강성이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 넓은 보에 정착된 인장철근의 항복이후 긴장재가 응력을 충분히 발휘하고 있으며 포스트텐션이 균열을 지연하였기 때문으로 사료된다.

6. 결 론

넓은 보-기둥 외부접합부에 대한 비탄성 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PS를 도입한 넓은 보-기둥 접합부의 유한요소해석에서 3개의 병진변위를 갖는 콘크리트 요소의 경우 단축진 전단전달계수는 0.85에서 열려진 전단전달계수가 0.2 일 때 가장 실험결과와 유사한 거동을 보였다.
- 2) 넓은 보-기둥 접합부에서 넓은 보의 콘크리트 단면적에 대한 영향은 잘 고려하고 있으나, 부분 PC 구조의 유한요소해석의 경우 PC와 현장 콘크리트 타설부분의 접합면은 실험결과와 초기균열면에서 다소 차이가 있으므로 요소 모델링시 완전접합부와 부분접합부의 경계를 적절히 반영할 필요가 있는 것으로 사료된다.
- 3) 현행 기준에서 제한하고 있는 넓은 보의 전단철근의 간격은 일반보를 기반으로 하고 있다. 그러나 넓은 보의 경우 기둥의 폭보다 넓은 콘크리트 단면적을 잘 반영하고 있으므로 현행 기준에서의 전단철근의 간격은 넓은 보에 대해서 다소 완화하여 고려할 필요가 있는 것으로 사료된다.
- 4) 본 시스템(PPS공법)을 이용한 콘크리트 강도변화에 따른 변수해석 결과, 대체적으로 강도가 증가할수록 그 내력은 증가하는 경향을 나타내고 있으며 콘크리트 강도 34MPa 이후가 10% 내·외로 그 증가량이 높게 나타나고 있다. 특히 그 증가량은 보의 폭이 넓을 수록 더욱 현저한 것으로 나타났다.
- 5) 본 시스템(PPS공법)을 이용한 변수해석에서 긴장재를 철근으로 치환한 경우 보의 내부의 동일 정착비에서 철근 보다 긴장재와 철근을 혼용한 경우가 내력과 강성의 증가가 더 현저한 것으로 나타났다. 이는 넓은 보에 정착된 인장철근의 항복이후 기둥 코어 외부에 정착된 긴장재가 응력을 충분히 발휘하고 있으므로 철근에 비해 포스트텐션이 균열을 지연하였기 때문으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(R01-2008-000-11381-0) 및 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 첨단도시개발사업(07도시재생B03)의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

삼성물산(주) (2003) PPS 공법의 실용화 기술개발에 관한 연구.

- 이은진, 김옥중, 문정호, 이리형 (2002) 단부 철근콘크리트 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조보의 비선형 이력거동, 한국전산구조공학회 논문집, 6, pp.379~387.
- 이종권, 최윤철, 이용택 (2007) 철근콘크리트 깊은 보의 전단 내력에 대한 개구부 보강 효과, 한국전산구조공학회 논문집, 12, pp.699~708.
- 임재형, 이리형 (1997) 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 변수별 효과에 관한 해석적 연구, 대한건축학회 논문집, 10, pp.291~300.
- 최윤철, 임재형, 문정호, 이리형, 권기혁 (2004) PC U형 단면을 사용한 포스트텐션된 넓은 보-기둥 외부접합부의 비탄성 거동, 대한건축학회 논문집, 20(12), pp.27~36.
- 최윤철, 임재형, 문정호, 이리형, 권기혁 (2005) 포스트텐션을 도입한 넓은 보의 기둥 코아 정착비에 따른 비탄성 거동 평가, 한국콘크리트학회 논문집, 17(1), pp.85~94.
- 최윤철, 임재형, 문정호, 이리형, 권기혁, 김대중 (2005) PC U형의 단면을 사용한 포스트텐션된 넓은 보-기둥 내부 접합부의 비탄성 거동, 대한건축학회 논문집, 21(1), pp.11~19.
- ACI committee 318 (2002) Building Code Requirements for Reinforced Concrete(318-83), American concrete Institute, Detroit.
- Hatamoto, H., Bessho, S., Matsuzaki, Y. (1991) Reinforced Concrete Wide Beam-to-Column Subassemblages Subjected to Lateral Load, Design of Beam-Column Joint for Seismic Resistance(ACI Publication SP-123), pp.291~316.
- Josef Hegger, Alaa Sherif, Wolfgang Roeser. (2004) Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections, *ACI Structural Journal*, Sem-Oct, pp.604~614.
- Klein, D. G. (1986) A Finite Element Model for Reinforced Concrete Slabs with Consideration of Transvers Shear Deformations, *Computation Modelling of Reinforced Concrete Structures*, E. Hinton and R. Owen, eds., Pineridge, Swansea, UK.
- Stehle, J. S., Goldsworthy, H., Mendis, P. (2001) Reinforced Concrete Interior Wide-Band Beam-Column Connections Subjected to Lateral Earthquake loading, *ACI Structural Journal*, May-June, pp.270~279.