

PC 기둥-H형강보의 볼트접합부에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on The Bolted Connection Between H-Beam and Precast-Concrete Column

조 은 영* 박 순 규**
Cho, Eun-young Park, Soon-kyu

ABSTRACT

The composite structural system with reinforced concrete column and steel beam has some advantages in the structural efficiency by complementing the shortcomings between the two systems. The system, however, has also a lot of problems in earthquake-proof capacity and construction process because it is wet method of construction. So, this paper proposed PCS(Precast Concrete Column and Steel Beam) structural system with dry method of construction. Purpose of this study is to enhance merit and control failure mechanism by installing Dog-Bone on H-beam.

1. 서론

1.1 연구의 목적

최근 선진외국을 중심으로 구조적 성능을 향상시키고 자원절감을 목표로 하는 새로운 구조시스템의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 그 결과에 의하여 개발된 RCS (Reinforced Concrete Column and Steel Beam) 구조시스템은 압축력에 효과적인 철근콘크리트부재를 기둥으로, 휨과 전단에 우수하고 또 경량인 철골부재를 보에 적용하여 신 개념의 복합구조 시스템으로 자리매김했다. 하지만 접합부의 내진성능과 기둥 콘크리트를 현장에서 타설해야하는 습식 공법이라는 점이 문제가 되어왔다. 콘크리트기둥과 철골보를 접합시킨다는 점은 기존의 RCS공법과 일치하지만 본 연구의 PCS (Precast Concrete Column and Steel Beam)구조는 건식공법으로서 작업환경이 양호하고, 콘크리트의 양생 공정이 불필요하기 때문에 공기를 단축할 수 있으며, 동절기에도 공사가 가능하다. 또한 일체형이 아니므로 연결부 해체가 용이해 부재의 재활용이 가능하다는 장점이 있다.

따라서 본 연구는 이미 개발된 '단부평판 관통형 볼트접합부' 형식을 응용하여 PC기둥과 철골보의 접합부 형식을 개선하고, 시공성 및 역학적 성능을 개선하여 고품질, 고부가가치화된 건설산업을 구현하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구의 범위

재래식 철근콘크리트 공사처럼 현장에서 타설,양생되어 일체화되는 공법 대신 공장에서 생산된 부재를 현장에서 단순히 조립할 수 있게 시스템화하기 위해서는 성능이 우수한 접합부의 개발이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 PC기둥 단면에 H형강보를 효과적으로 연결하기 위해 보와 연결되는 PC기둥 접합부를 단부평판-관통형 볼트 접합부 형식을 이용하여 개선하고 아울러 보의 단부를 Dog-Bone 형식으로 개선하여 파괴모드를 조절한다.

또한 접합부의 채움재로서 무수축 몰탈 대신 네오프렌 페드를 사용하여 부재의 설치뿐만 아니라 해체도 용이하게 할 수 있는 완전 건식공법이 가능한 접합부를 개발하고자 한다. 부재의 조립-해체가 용이하면 건설 작업환경을 개선할 수 있고 동시에 부재의 재활용도를 높일 수 있어 환경 친화적 공법을 구현하는데 크게 공헌할 것이다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 시험체 계획 및 변수

* 정회원, 울산대 건축학과 석사과정
** 정회원, 울산대 건축학부 교수, 공학박사

시험체는 관통형 볼트와 커플러를 사용하여 현장에서 조립, 시공이 편리하도록 개선한 PC기둥(400×400-3.8M)과 H형강보(400×200×8×13) 사이의 단부평판 형식의 접합부를 포함한 “ㄨ”자형 보-기둥 부분구조체이다. 커플러는 기둥 제작시 접합부 중앙에 미리 설치하여 현장에서 표준형 고장력 볼트를 이용함으로써 H형강보와 기둥을 용이하게 체결할 수 있도록 하였다. 또, 관통형 볼트는 접합부 상하부에 문혀진 슬리브를 통해 후 공정으로 조립될 수 있도록 하였다. 기둥과 단부평판 사이에는 채움재로서 건식공법이 가능한 경도 95의 네오프렌 패드를 개발하여 사용하였다.

본 실험에서의 변수는 철골보의 Dog-Bone의 크기로 접합부에서 100mm 떨어진 위치에 각각 0cm, 3cm, 5cm의 Dog-Bone를 설치하여 30mm 평판에 맞댐 용접하였다.

표 1 시험체명

NO.	시험체명	Dog-Bone크기
1	3S1-NS-SL	0cm
2	3S1-3S-SL	3cm
3	3S1-5S-SL	5cm

3 S 1 - 3 S - SL

bolt : SL - sleeve 8EA+coupler 2EA
 CO - coupler 10EA
 Scallop : NS - 0 cm
 3S - 3 cm
 5S - 5 cm
 전단보강 : 1 - HD13@50
 2 - HD13@100
 3 - 대각보강
 채움 여부 : S - Solid
 V - Void
 콘크리트강도 : 3 - 300kg/cm²

2.2 가력 및 측정방법

본 연구에서는 접합부 실험크기의 “ㄨ”형 보-기둥 부분구조 시험체에 대하여 내진성능을 분석하기 위하여 반복하중 가력시험을 계획하였다. 이를 위해 시험체 양쪽의 보 단부에 최대 50tf까지 가력이 가능한 Actuator를 설치하여 상하방향으로 가력하였다.

Actuator 가력 프로그램은 ACI 내진성능 평가기준에 의해 변위제어를 하였다. ACI 평가기준은 중간 Drift Ratio를 기준으로 변위제어를 하고 ±3.5%까지를 상한으로 요구하고 있지만, 본 실험에서는 강구조물 내진성능과 비교·평가하기 위해 Actuator의 변위가 허용하는 범위 내에서 최대 ±7.0% (±105mm)까지 계획하였다.

그림 1 시험체 set-up 도면

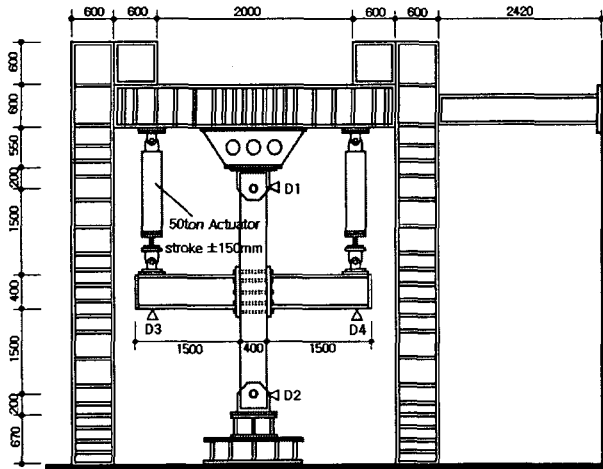


그림 2 가력 곡선 (ACI Code)

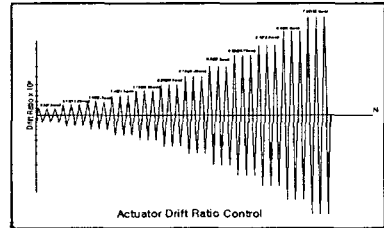
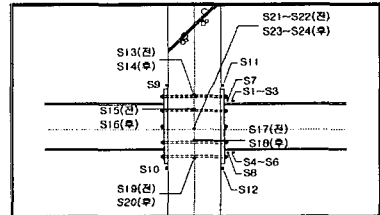


그림 3 스트레인 게이지 부착도



시험체의 변형특성을 파악하기 위해 볼트 및 H형강보, End-Plate, PC기둥에 스트레인게이지를 부착하였고, Actuator의 자체 변위와 보 단부 가력점의 변위를 비교·측정하기 위하여 500mm 변위계를 좌우 보 가력점 하단에 각각 설치하였다. 또한 PC기둥 상하부의 지점변위를 측정하기 위하여 200mm 변위계를 2개 설치하였다.

3. 재료 실험

3.1 소재 인장 실험

철골은 KS B 0801 1A호, 볼트는 KS B 0801 4호, 철근은 KS D 3504 2호(HD13), 3호(HD25,HD32)에 의거하여 각

각 3개씩 시편을 제작하였다. 단, 철근의 재질은 SD40, 철골은 SS400, 볼트는 SCM440이다.

3.2 볼트 제품 실험

M24 볼트용 치구를 제작하여 볼트, 와셔, 너트 세트를 끼워 조립한 뒤 UTM에 치구를 걸어 인장 test를 했다. 볼트는 나사산에서 절단이 되었고 커플러는 중앙 철근부에서 파단이 일어났다.

3.3 콘크리트 압축강도 실험

KS F 2404에 의거하여 $\varnothing 10 \times 20$ cm의 실린더형 공시체를 공칭강도 300(kg/cm²)과 500(kg/cm²) 각각 5개씩 제작하였고 최대값과 최소값을 제외한 나머지 세 개의 시험체로 평균값을 계산했다. 단, 공시체는 PC기등과 같은 조건으로 증기양생했으며 28일 강도이다.

표 2 소재의 성능 실험 결과

시험편	항복강도 (kgf/mm ²)	인장강도 (kgf/mm ²)	연신율 (%)	시험방법
Flange	35.31	49.74	29.83	KS B 0802
Web	42.15	54.17	29.80	KS B 0802
단부평판	34.64	51.93	31.27	KS B 0802
HD32 철근	43.90	66.97	25.2	KS B 0802
HD25 철근	58.21	70.02	16.17	KS B 0802
HD13 철근	67.74	81.67	15.0	KS B 0802
M24 볼트	137.01	144.02	13.87	KS B 0802

표 3 볼트 제품 실험 결과

시험편	최대하중 (ton)	인장강도 (kgf/mm ²)	시험방법
M24 볼트	41.28	116.94	KS B 1010
$\varnothing 20$ 커플러	38.7	123.18	KS B 1010

표 4 콘크리트 압축강도 실험결과

시험체	최대하중 (ton)	압축강도 (kg/cm ²)	시험방법
강도 300	24.44	311	KS F 2405
강도 500	29.32	378	KS F 2405

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험 결과

(1) 3S1-NS-SL

접합부 전·후면에서 전단력을 받아 중심부부터 전단 균열이 발생했고, H형강보의 단부평판이 연결된 좌우면은 접합부 상하부 부근에서 약간의 휨 균열이 발생했다. 접합부의 사인장 균열은 Drift 1.0%에서 처음으로 미세하게 나타났고 1.75%에서 0.5mm의 균열이 발생했으며, 2.2%에서 균열을 따라 전·후면 콘크리트의 박피현상이 나타나기 시작했다. 또 Drift 2.75%에서 처음으로 접합부 피복부분 콘크리트가 전단파괴에 의해 떨어져 나갔다. Drift 7%까지 실험이 종료된 상황에서는 접합부 피복부분 콘크리트가 전단파괴에 의해 거의 다 떨어져 나갔다. 그러나 띠근 내부 코어부분 콘크리트는 경미하게 손상을 받아 상당한 강도 성능을 보유하고 있는 것으로 판단된다.

접합부의 전·후면은 콘크리트가 모두 떨어져 나갔지만 실험 종료 후에도 좌우면은 미세한 균열만이 나타났다. 이는 접합부 사이에 무수축 몰탈 대신 채워 넣은 네오프랜이 채움재의 역할을 충분히 해냈을 뿐 아니라 충격을 흡수하는데도 큰 역할을 한 것으로 보인다.

그림 4 3S1-NS-SL 시험체 파괴양상



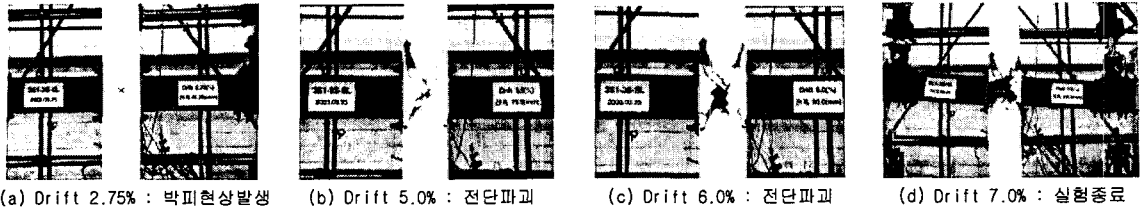
(a) Drift 1.75% : 균열발생 (b) Drift 2.75% : 전단파괴발생 (c) Drift 5.0% : 전단파괴 (d) Drift 7.0% : 실험종료

(2) 3S1-3S-SL

접합부 전·후면에서 전단력을 받아 중심부부터 전단 균열이 발생했고, 상하부에 약간의 휨 균열도 발견되었다. 또, H형강 보의 단부평판이 연결된 좌우면은 접합부 상하부 부근에서 휨 균열이 발생했다. 접합부의 사인장 균열은 Drift 0.75%에서 처음으로 미세하게 나타났고 2.2%에서 0.5mm의 균열이 발생했으며, 2.75%에서 박피현상이 나타났다. 또 Drift 3.5%에서 처음으로 접합부 피복부분 콘크리트가 전단파괴에 의해 떨어져 나갔다. 초기균열은 3S1-NS-SL시험체보다 먼저 생겼지만, 3S1-3S-SL시험체가 더 큰 힘을 견뎌낸 것으로 판단된다. Drift 2.2%에서 지점부근 균열이 발생해 3S1-NS-SL시험체와는 다른 양상을 나타냈다. Drift 7%까지 실험이 종료된 상황에서는 접합부 피복부분 콘크리트가 전단파괴에 의해 거의 다 떨어져 나갔다. 그러나 띠근 내부 코어 부분 콘크리트는 거의 손상을 받지 않아 높은 강도 성능을 보유하고 있는 것으로 판단된다.

접합부의 전·후면은 3S1-NS-SL 시험체와 마찬가지로 콘크리트가 모두 떨어져 나갔지만 좌우면은 0.5~1.0mm 정도의 균열이 나타났다. 이는 End-Plate가 휘면서 영향을 미친 것으로 보이나, 접합부 사이의 네오프랜이 충격을 상당량 흡수하여 그리 큰 손상은 아닌 것으로 판단된다.

그림 5 3S1-3S-SL 시험체 파괴 양상

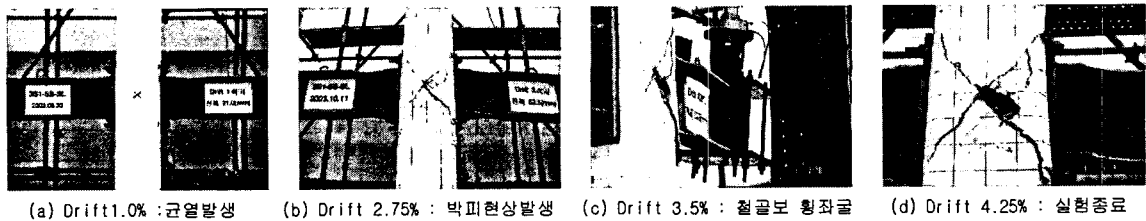


(3) 3S1-5S-SL

접합부 전·후면에서 전단력을 받아 중심부부터 전단 균열이 발생했고, H형강 보의 단부평판이 연결된 좌우면은 접합부 상하부 부근에서 휨 균열이 발생했다. 접합부의 사인장 균열은 Drift 0.5%에서 처음으로 미세하게 나타났고 1.4%에서 0.5mm의 균열이 발생했으며, 2.75%에서 박피현상이 나타났다. Drift 3.5%에서는 처음으로 접합부 피복부분 콘크리트가 전단파괴에 의해 떨어져 나갔고, 우측 철골보가 횡좌굴하기 시작했다. Drift 4.25%에서는 양쪽 철골보 모두 횡좌굴 현상이 나타났고 이는 강도저하의 원인이 되었다.

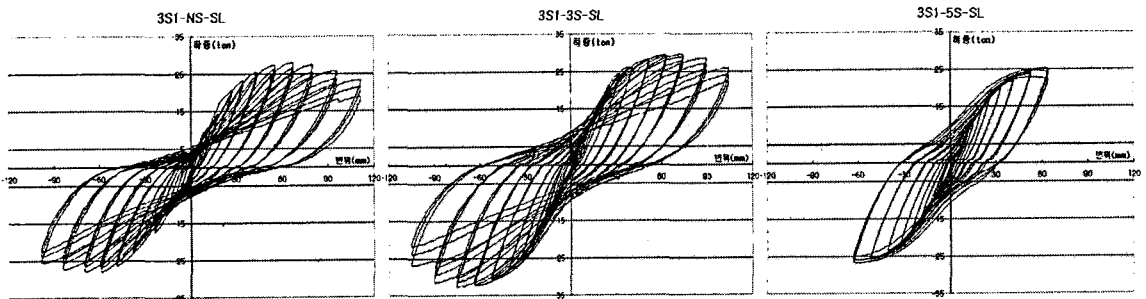
콘크리트의 피복이 완전 파괴되기 전에 횡좌굴에 의한 철골보의 파괴가 있었지만 강도저하가 일어났고 철골보가 제 힘을 발휘하지 못했으므로 Dog-Bone의 크기를 더 줄이는 것보다는 기둥의 능력을 강화시키거나 보의 춤을 줄이는 것이 더 바람직할 것으로 판단된다.

그림 6 3S1-5S-SL 시험체 파괴 양상



4.2 결과 분석

그림 7 하중 - 변위 곡선



(1) 3S1-NS-SL

시험체는 Drift 1.5% 정도에서 항복하여 Drift 4.25%에서 최대하중을 나타냈고, 상하 방향의 변위에 대하여 최대하중이 2~3ton 정도 차이가 나는 것으로 관측되었다. Drift 3.5%를 넘어서면서 처음 강도저하가 관측되었고, 이후 점점 증가하는 경향을 보이고 있으나 실험이 종료된 Drift 7%에서도 강도저하는 18%정도로 심한 정도는 아닌 것으로 분석되었다. 또한 Drift 7%에서 강성이 초기 강성의 17%정도로 양호한 것으로 분석되었다.

(2) 3S1-3S-SL

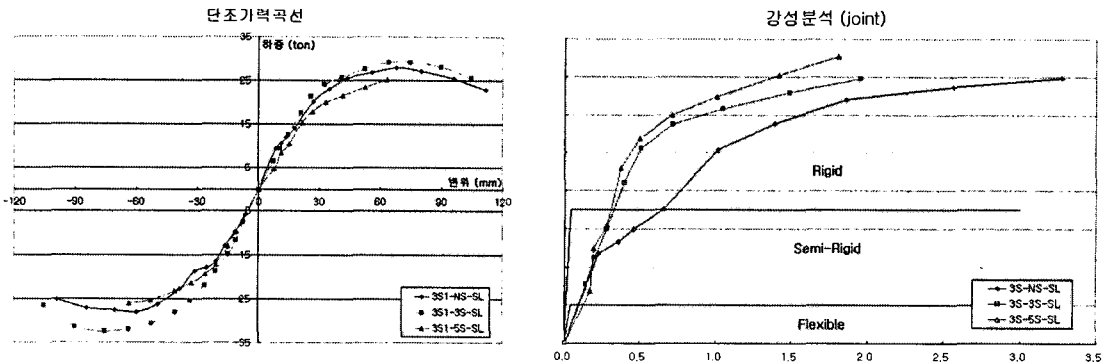
시험체의 거동에서 초기에 선형 탄성구간이 뚜렷이 나타났다. Drift 1.75%에서 구조물이 항복하였고 Drift 4.25%에서 최대하중이 나타나는 것으로 관측되었다. Drift 5%를 넘어서면서 강도저하가 관측되었으나 실험이 종료된 Drift 7%에서도 강도저하는 11%정도로 경미한 것으로 분석되었다. 강성저하는 Drift 3.5%를 넘어 서면서 증가하는 경향을 보이고 있으나 종료된 Drift 7%에서 강성이 초기 강성의 17%정도로 양호한 것으로 분석되었다.

철골보 Scallop 부분에서 항복이 발생하기는 하였으나 강재의 Strain Hardening에 의한 Over - strength가 커서 기둥보 접합부 콘크리트에서 심한 균열이 발생하여 콘크리트가 먼저 파괴에 이르는 것으로 분석되었다. 콘크리트 부분이 심하게 파괴되긴 했지만 콘크리트의 피복부분에서만 파괴가 일어났고 띠근 내부의 콘크리트는 거의 손상이 없었다. 이는 보수가 가능한 범위로 구조물의 성능에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

(3) 3S1-5S-SL

시험체는 Drift 1.5% 정도에서 항복하여 실험 종료시점인 Drift 4.25%에서 최대하중을 나타냈다. 황좌굴 현상 때문에 Drift 7.0%까지 가력하지 못했고, 종료시점까지 강도저하는 거의 일어나지 않았다. 하지만 시험체의 강도는 앞서 실험한 두 시험체의 강도에 미치지 못하는 값으로 나타났다. 이는 철골보의 황좌굴에 의해 전체 구조물의 강도가 저하된 것으로 판단된다.

그림 8 결과 분석



세 시험체 모두 Semi-Rigid 영역에 포함되었고 Dog-Bone의 크기가 클 수록 초기 강성은 작았지만 더 강한 강성을 나타내는 것으로 나타났다. 또한 강성저하 현상도 상당히 줄어드는 것으로 판단된다.

5. 결론

- (1) Dog-Bone의 유무에 관계없이 항복이후 반복 변위에 대하여 강도저하 및 강성저하 현상이 발견되었으나 모두 ACI 내진성능 요구조건을 훨씬 상회하는 성능이다.
- (2) Dog-Bone이 큰 시험체가 작은 시험체보다 더 강한 강성을 갖고 있으며 강성저하도 적어 우수한 성능을 가지는 것으로 나타났다.
- (3) 철골보가 항복하더라도 강재의 Strain Hardening에 의한 Over-strength가 50%정도되어 보 기둥 접합부의 피복콘크리트에 심한 사인장 균열이 발생하여 파괴에 이르는 것으로 분석되었다.
- (4) 접합부 피복 콘크리트 부분이 전단균열로 심하게 파괴되긴 했지만 띠근 내부의 콘크리트는 손상이 경미하여 보수가 가능한 범위이고, 강진에 대한 내진성능에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이상훈(1999), 콘크리트 충전된 각형강관 기둥과 H형강보의 볼트 접합부에 관한 실험적 연구II, 석사학위 논문, 울산대학교 건축학과.
2. 현대산업개발(1999), 콘크리트 충전 각형강관 기둥의 실용화 연구
3. 전진우(2001), CFT 기둥과 H형강보 관통형 볼트 접합부의 내진성능에 관한 실험적 연구, 석사학위 논문, 울산대학교 건축학과.
4. 한국 KS 표준집
5. 한국 강구조 요람
6. ACI, "Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames Easier on Structural Testing", American Concrete Institute.