

쐐기의 원리를 이용한 합성 보-기둥 접합부의 내진성능에 관한 연구

Seismic Performance of Composite Beam-to-Column Joints Using Wedges

박종원¹⁾

Park, Jong-Won

국문 요약 >> 이 연구에서는 새로운 접합장치인 자동체결장치(Self-Locking Connectors)를 사용한 강재보-PC기둥 접합부의 내진성능에 대한 연구를 수행하였다. PC기둥(또는 합성기둥)과 강재보로 이루어진 합성모멘트골조는 각각의 재료의 장점을 최대한으로 이용한 합리적인 구조형식이다. 그러나 서로 다른 두 재료 사이의 접합에 따른 어려움으로 인해 접합부의 상세가 복잡해지고 제작비가 상승하는 단점을 가지고 있다. 반면에 자동체결장치는 쐐기의 원리를 이용한 접합장치로서 시공이 단순한 장점이 있다. 또한 자동체결장치를 사용한 접합부는 용접을 사용하지 않으므로써 기존의 접합부에 비해 내진성능을 개선할 수 있다. 본 연구에서는 자동체결장치를 사용한 강재보-PC기둥(또는 합성기둥) 접합부에 대한 내진성능을 검증하기 위해 반복하중 실험을 수행하였다. 실험결과 자동체결장치를 사용한 보-기둥 접합부는 우수한 내진성능을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 보-기둥 접합부, 자동체결장치, 내진성능, 쐐기, 반복하중 실험

ABSTRACT >> The purpose of this study was to develop a new connection method between steel beams and PC columns known as SL connectors. Composite moment frames consisting of PC columns (or composite columns) and steel beams make the best use of advantages of both concrete and steel materials. However, the connection between two members of different materials can be complex and/or increase the fabrication costs significantly. The concept of SL connectors is based on using wedges and the emphasis is on a self-locking (SL) feature. SL connectors are easy to install and provide better seismic performance compared to conventional connections. To evaluate the seismic performance of the steel beam-to-PC column joints with SL connectors, cyclic load tests were conducted. Test result showed that steel beam-to-concrete column joint with SL connectors was able to provide sufficient performance for use in seismic resistant moment frames.

Key words Beam-to-column connection, SL connectors, seismic performance, wedges, cyclic load tests

1. 서론

1.1 연구의 목적

장스팬화와 경량화에 유리한 강재보와 압축력 및 횡강성에 유리한 PC 또는 합성기둥으로 이루어진 복합구조는 각 재료의 장점을 최대한 활용한 합리적인 구조형식이다. 그러나 이러한 복합구조는 서로 다른 재료로 이루어진 부재 사이의 접합에 따른 어려움으로 인해 실용화가 활발히 이루어지지 못하고 있다. 본 연구의 목적은 PC 기둥(또는 합성기둥)과 강재 보의 접합부에 대해 시공성이 우수한 새로운 접

합형식을 제안하고 반복하중 실험을 통해 내진성능을 검증함으로써 시공성과 구조적 성능이 우수한 대형 업무용 PC 조립식 건축구조 시스템을 개발하는 것이다.

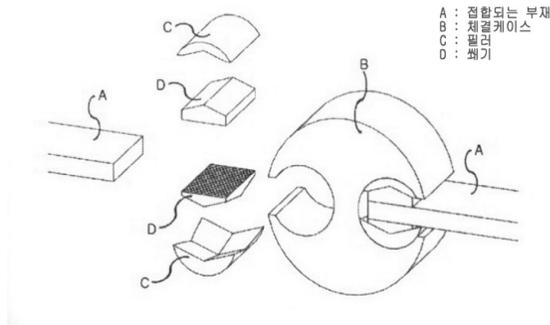
1.2 연구의 방법 및 절차

Park와 Hwang⁽¹⁾은 쐐기의 원리를 이용한 새로운 접합장치인 자동체결장치(Self Locking Connectors, 이하 SL Connectors)를 제안하였다. 그림 1은 SL Connectors의 구성요소를 나타낸 것이다. 그림 2는 그 중에서 쐐기의 자유물체도를 나타낸 것으로 접합되는 부재에 하중이 작용하면 쐐기작용에 의해 쐐기와 부재의 접합면에 수직력 Q 가 유발되며 이로 인해 접합면에는 마찰력 $\mu'Q$ 가 생기게 된다. 수직력 Q 는 부재에 작용하는 하중에 비례하여 증가하기 때문에 하중이 증가하면 마찰력도 비례하여 증가하게 되므로 부재

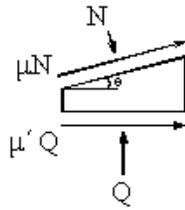
¹⁾ 정희원·홍익대학교 건축공학과 교수, 공학박사
(대표저자: jwp@hongik.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 9. 20 / 심사종료일 : 2007. 11. 19)



〈그림 1〉 자동체결장치의 구성요소



〈그림 2〉 쐐기의 자유물체도

가 파단에 이르기까지 미끄러짐이 발생하지 않는다.

본 연구에서는 시공성이 우수한 것으로 알려진 자동체결장치(SL connectors)를 실용화하기 위해 SL Connectors를 사용한 강제 보와 PC 기둥 접합부 실험체 그리고 강제 보와 합성기둥 접합부 실험체에 대해 반복하중 실험을 수행하였다. 실험체는 십자형 형태이며 실물 크기로 제작하였다.

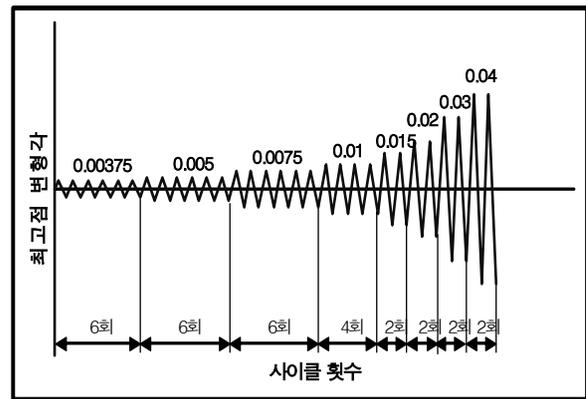
1.3 기술동향

강제 보와 철근 콘크리트 기둥 사이의 접합형식으로는 지금까지 보의 일부분을 기둥을 관통하도록 하여 제작한 후 보의 나머지 부분을 현장에서 이음하는 형식이 개발되었다⁽²⁾. 이외에도 박순규⁽³⁾는 보의 단부에 엔드 플레이트를 용접한 후 볼트를 사용하여 기둥과 접합하는 형식에 대한 연구를 수행하였다. 한편 쐐기의 원리를 사용한 보-기둥 접합장치로는 ATLSS connections이 있으나 보와 기둥 사이의 편접합으로 주로 건설 자동화를 대상으로 한 것이다⁽⁴⁾.

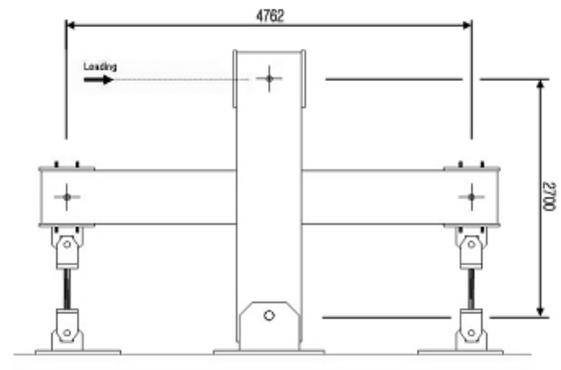
2. 실험내용

2.1 반복하중 실험

SL connectors를 사용한 강제 보와 PC 기둥 접합부의 내진성을 검증하기 위해 SAC⁽⁵⁾의 하중이력방법에 따라 정적 반복하중 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 하중이력은 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 하중 이력



〈그림 4〉 실험체 형상

2.2 실험체

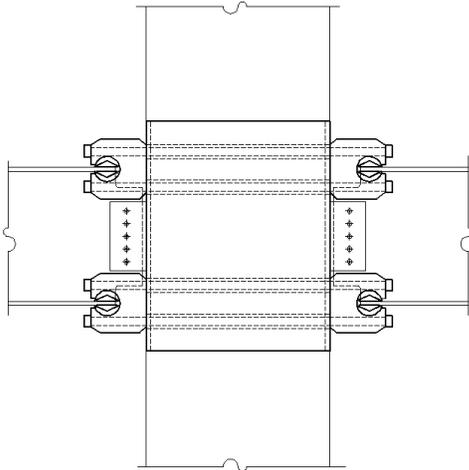
본 연구에서는 강제 보와 PC 기둥 접합부 실험체, 강제 보와 각형 충전강관 기둥 접합부 실험체 그리고 강제 보와 원형 충전강관 기둥 접합부 실험체의 총 3개의 실험체에 대해 실험을 수행하였다. 그림 4는 실험체의 형상, 가력 및 지지 조건을 나타낸 것이다. 보의 지지점 사이의 거리는 4762mm이며 기둥의 가력점과 지지점 사이의 거리는 2700mm이다.

보 부재는 H-600×200×11×17의 SS400 형강을 사용하였다. 한편 각형 강관기둥은 600×600×22mm를 사용하였으며 원형 강관기둥은 ϕ 600×22mm를 사용하였다. 강관기둥은 SS400의 강관을 냉간성형하여 제작하였다. PC 기둥의 단면은 800×600mm이며 20개의 HD32를 중방향 철근으로 사용하였다. 띠철근은 HD16을 기둥의 전 길이에 걸쳐 100mm의 간격으로 설치하였다. PC 기둥의 보-기둥 접합부 위치를 800×600×10mm의 강관으로 보강하였다. PC 기둥과 충전강관 기둥은 모두 동일한 콘크리트를 사용하여 제작하였다. 표 1은 재료시험의 결과를 나타낸 것이다.

그림 5는 보와 기둥의 접합상태를 나타낸 것이다. 보의 웨브는 기둥에 부착된 전단 플레이트(shear tabs)와 볼트접

〈표 1〉 재료 시험 결과

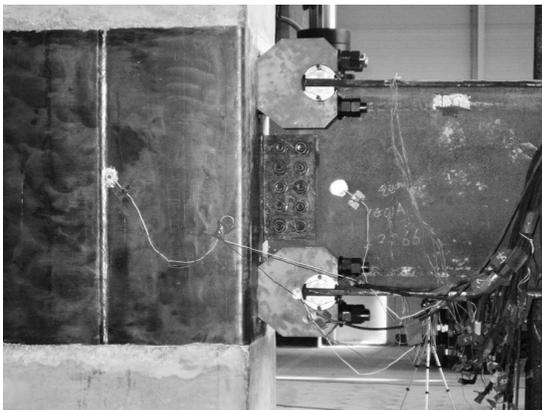
		F_y (MPa)	F_u (MPa)	연신율 (%)
보	플랜지	409	611	26.3
	웹브	435	625	25.1
기둥	10 T	331	520	31.3
	22 T	318	485	33.0
콘크리트		$f'_c = 35$ MPa		



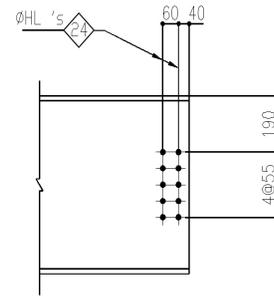
〈그림 5〉 보와 기둥의 접합상태



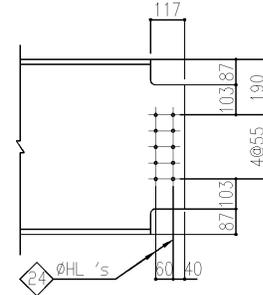
〈그림 6〉 실험 상황



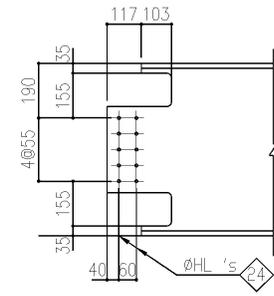
〈그림 7〉 강재 보와 PC 기둥의 접합부



(a)



(b)



(c)

〈그림 8〉 보 접합 디테일

합을 통해 연결하며 보의 플랜지는 SL connectors를 사용하여 기둥과 연결하였다. SL connectors와 기둥의 연결은 SL connectors와 기둥의 내부에 형성된 구멍을 통해 직경 35mm의 열처리한 SCM 440 환봉을 관통시킨 후 SL connectors의 바깥에서 너트를 사용하여 체결하였다.

가력은 변위용량이 250mm인 2,000kN Hydraulic actuator를 사용하였다. 그림 6과 그림 7은 각각 강재 보와 PC 기둥 접합부 실험체의 실험상황과 접합부를 나타낸 것이다.

그림 8은 보와 기둥의 접합위치에서 보의 접합 디테일을 나타낸 것으로 PC 기둥과 원형 충전강관 기둥 시험체의 경우에는 그림 8(b)와 같은 디테일을 사용하였다. 한편 각형 충전강관 기둥 시험체의 경우에는 반복하중 성능에 대한 보 부재 접합 디테일의 영향을 조사하기 위해 기둥의 양면에 각각 그림 8(a)와 그림 8(c)의 디테일을 사용하였다. 그림 8(a)의 디테일은 접합부 위치의 보의 가공이 간단해지는 장점이 있으나 대신에 기둥에 연결되는 전단 플레이트(shear tabs)의 폭이 커지는 단점이 있다. 한편 그림 8(c)의 디테일

은 체결케이스 위치의 보 웹를 잘라냄으로써 체결장치의 시공이 용이해지는 장점을 가지고 있으나 잘라낸 위치의 보 웹브와 플랜지의 모서리 부분에 응력집중이 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다.

3. 실험결과

3.1 강재 보와 PC 기둥 접합부

그림 9는 실험체의 하중-회전각 곡선을 나타낸 것으로 보의 소성모멘트 이상의 최대내력과 0.09 라디안의 총회전각을 발휘할 수 있었다. 이는 AISC 내진기준에서 특수모멘트 골조에 요구되는 0.04 라디안의 총회전각을 크게 초과하는 값이다⁶⁾. 다만 핀칭현상이 크게 나타나 특수모멘트 골조로서의 내진성능의 검증을 위해서는 이의 개선에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 0.09 라디안의 회전각에서도 보 또는 기둥 부재의 심한 파괴는 발생하지 않았으나 내력이 최대값의 80% 정도로 감소하여 0.09 라디안의 사이클을 마친 후 실험을 끝내었다.

그림 10(a)는 0.08 라디안의 회전각에서 보 플랜지의 국부좌굴을 그림 10(b)는 PC 기둥면의 지압변형을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 비탄성 변형이 보 플랜지의 항복 및 국부좌굴에 따른 소성힌지의 형성 뿐 아니라 기둥면의 지압변형에 의해 발생하였으며 지압변형은 하중-회전각 곡선의 핀칭현상의 주된 원인인 것으로 판단된다.

PC기둥 접합부 위치에 사용한 강관의 폭두께비는 60으로 이는 AISC에서 충전형 각형강관 기둥 폭두께비 제한값 55를 초과한다. PC기둥에 사용된 강관은 강재보와의 접합을 위한 것으로 축방향 하중을 받지 않으므로 AISC의 제한값을 적용하지 않았으나 결과적으로 지압변형이 크게 발생하였다. 접합부 위치에서 기둥면을 보다 두꺼운 강관으로

보강할 경우 기둥면의 지압변형으로부터 보 플랜지의 소성힌지로 파괴모드를 유도할 수 있으며 이로 인해 핀칭현상이 감소하고 최대내력이 증가할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 강재 보와 각형 충전강관 기둥 접합부

그림 11은 실험체의 하중-회전각 곡선을 나타낸 것으로 0.07 라디안의 회전각을 발휘할 수 있었다. 그림 12는 파괴

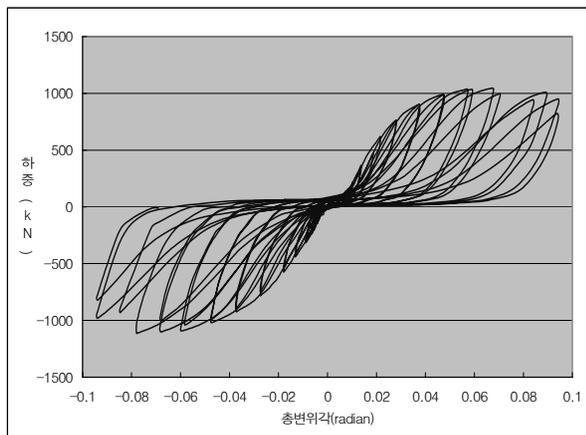


(a) 보 플랜지의 국부좌굴

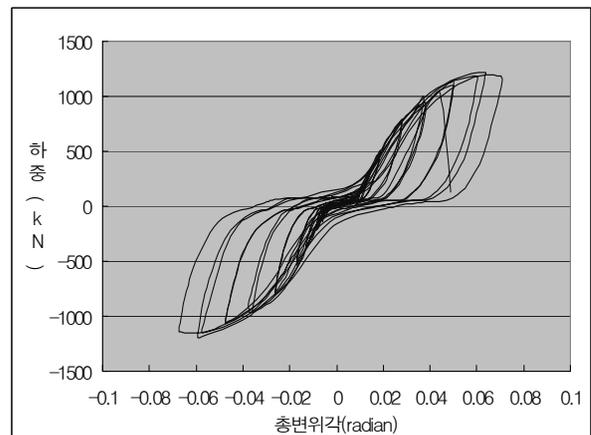


(b) 기둥면의 지압파괴

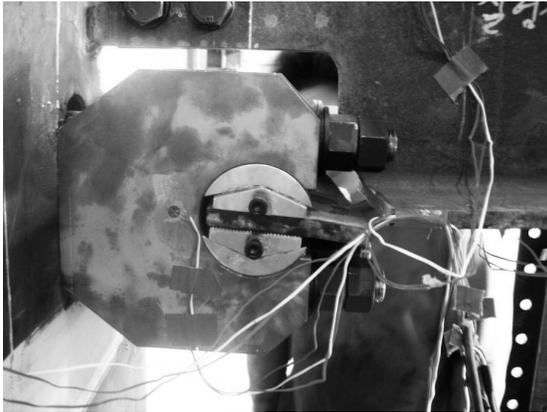
〈그림 10〉 접합부의 비탄성 변형



〈그림 9〉 하중-변위 곡선



〈그림 11〉 하중-변위 곡선



〈그림 12〉 보 플랜지의 파단

상황을 나타낸 것으로 0.07 라디안에서 두 번째 재하 사이클 도중 보 플랜지의 파단이 발생하였다. 파단은 그림 8(c)의 접합 디테일에서 발생하였다. 파단은 보 플랜지와 웨브가 만나는 모서리 위치에서 시작하여 플랜지 쪽으로 진전되었다. 그림 8(c)의 디테일은 SL connectors의 설치에는 유리한 디테일이나 플랜지와 웨브가 만나는 모서리 위치에서의 응력집중에 의해 조기파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

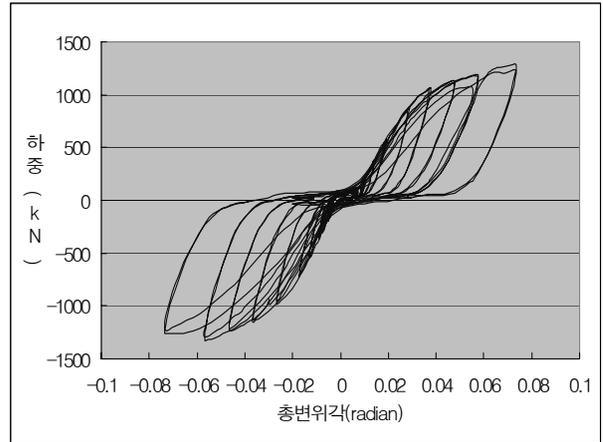
3.3 강제 보와 원형 충전강관 기둥 접합부

그림 13은 실험체의 하중-회전각 곡선을 나타낸 것으로 0.07 라디안의 회전각을 발휘할 수 있었다. 그림 14는 0.07 라디안에서 보 플랜지의 국부좌굴을 나타낸 것으로 이 실험체는 비탄성 변형이 보의 항복 및 국부좌굴에 의해 발생하였다.

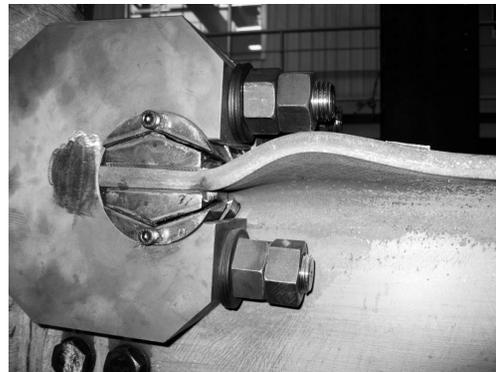
0.07 라디안에서 내력 감소가 발생하지 않았으나 보의 횡방향 변위를 지지하는 지지대에 심한 변형이 생겨 0.07 라디안의 사이클을 마친 후 실험을 종료하였다. 한편 하중-회전각 곡선에서의 편칭현상은 SL connectors 내에서의 미끄러짐과 SL connectors와 기둥을 연결하는 체결부의 인장변형에 의한 것으로 판단된다.

3.4 기존접합형식과의 비교

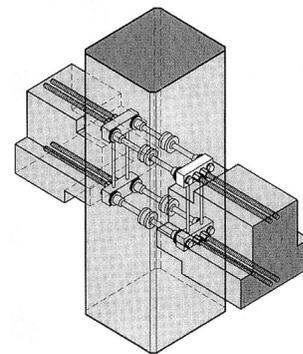
그림 15(b)는 그림 15(a)와 같은 DDC(dywidag ductile connection) 접합부를 사용한 PC 보와 PC 기둥의 접합부 시험체에 대한 반복하중 실험결과를 나타낸 것이다⁽⁷⁾. 본 연구에서 H형강 보-PC 기둥 접합부 시험체는 실험결과를 그림 15의 DDC 접합부 시험체의 경우와 비교하기 위해 기둥 부재의 치수, 가력 및 지지상황이 같도록 설계하였다. 보의 경우에는 양 지지점 사이의 길이는 동일하며 DDC 접합부 시험체는 360mm×600mm 단면의 PC 부재를 사용한 반면



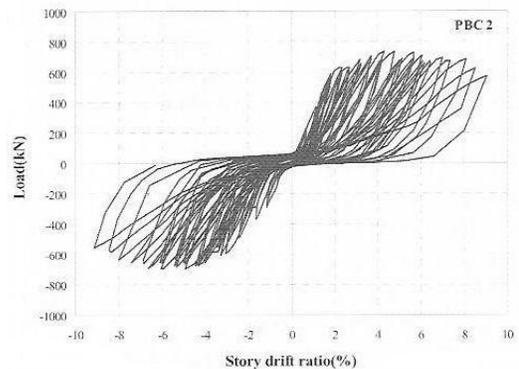
〈그림 13〉 하중-변위 곡선



〈그림 14〉 보 플랜지의 국부좌굴



(a)



(b)

〈그림 15〉 DOC 접합부

본 연구의 시험체는 H-600×200×11×17 형강을 사용하였다 (이는 동일한 층고를 유지하면서 강재 보의 무게가 PC 보의 약 1/5에 해당함을 의미한다).

그림 15(b)와 그림 9의 하중-회전각 곡선을 비교해 보면 H형강 보-PC 기둥 시험체도 DDC 접합부 시험체와 유사한 연성능력을 발휘할 수 있음을 알 수 있다. 한편 최대내력은 H형강 보-PC기둥 시험체의 경우가 50% 정도 더 크므로 그만큼 에너지 흡수능력이 크게 증가하게 된다. 따라서 보의 층을 동일하게 유지하면서도 프리캐스트 보 대신에 강재 보를 사용함으로써 내진성능을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

시공성과 구조적 성능이 우수한 대형 업무용 PC 조립식 건축구조 시스템을 개발하는 것을 목적으로 SL connectors를 사용한 강재 보와 PC 기둥 접합부 시험체 그리고 강재 보와 합성기둥 접합부 시험체에 대해 반복하중 실험을 수행하였다. 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 강재 보와 PC 기둥 접합부의 경우 0.09 라디안의 총회전각을 발휘할 수 있었다. 다만 보에 충분한 소성힌지가 발생하기 전에 기둥의 지압변형이 발생하였다.
2. 강재 보와 PC 기둥 접합부는 동일한 보 층을 갖는 기존의 PC 보와 PC 기둥 DDC 접합부에 비해 연성능력은 비슷하나 보의 강도증가로 인해 에너지흡수능력이 증가하였다.
3. 강재 보와 각형 충전강관 기둥 접합부의 경우 0.07 라디안의 총회전각에서 보의 접합 디테일에 따른 응력집중으로 인해 보 플랜지의 파단이 발생하였다.
4. 강재 보와 원형 충전강관 기둥 접합부의 경우 0.07 라디안의 총회전각에서 보의 횡방향 지지대에 심한 변형이 발생하여 실험을 중단하였다.

3개의 실험체 모두 편칭현상에 의한 변형이 0.01 라디안 정도에 해당되며 전체 회전각에서 이를 빼더라도 내진기준에서 특수모멘트 골조에 요구되는 0.04 라디안 이상의 총회전각을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 내진성능의 개선을 위해 편칭현상의 개선이 반드시 필요하며 SL connectors 내에서의 미끄러짐과 체결봉의 늘어남이 편칭현상의 주요한 원인으로 나타나 후속연구를 통해 이러한 편칭현상을 해결해 나갈 계획이다.

감사의 글

이 논문은 건설기반기술혁신사업 공기단축형 복합구조시스템 건설기술개발 1-2세세부과제('05~'07) 대형 업무용 PC 조립식 건축구조 시스템 개발 연구결과의 일부입니다.

참고 문헌

1. Park, J. W. and Hwang I. K., "Development of a New Steel Connection", Steel Structures, Vol. 6, 2006.
2. 이리형 외, "LC Frame을 이용한 복합화공법의 개발 및 성능평가", 삼성건설 연구보고서, 2000.
3. 박순규, "PCS 구조시스템 개발과 실용화 연구보고서", 한국건설교통기술평가원, 2005.
4. Fleischman, R.B, et. al., "Development, Analysis and Experimentation of ATLSS connections", *Proceedings of the First World Conference on Constructional Steel Design*, Dec., Mexico, 1992.
5. Krawinkler H. et al., "Loading histories for seismic performance testing of SMRF components and assemblies", Rep. No. SAC/BD-00/10, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif., 2000
6. AISC, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", Chicago, 2005.
7. 송형수, 유승룡. "반복하중을 받는 프리캐스트 콘크리트 건식 보-기둥 연결부의 거동 분석." 한국콘크리트 학회 논문집, 제 18권 제4호, 2006, pp. 497-506.