

특 집

|| 최근 프리캐스트 콘크리트의 신기술 ||

프리캐스트 콘크리트 보-기둥 내진 접합부

- Precast Concrete Beam-Column Connection Subject to Seismic Load -



박홍근*
Park, Hong Gun



홍성걸*
Hong, Sung Gul



이봉학**
Lee, Bong Hak



유승룡***
Yu, Sung Yong

1. 서 론

통상적으로 철근 콘크리트 구조물의 경우 습식 공법으로 현장에서 모든 작업이 이루어지며 인건비, 거푸집 비용, 공사비 등이 증가하게 되므로, 이러한 문제점을 보완할 수 있는 프리캐스트 콘크리트 공법의 필요성이 증대되고 있다. 프리캐스트 콘크리트 공법은 건식 공법으로서 현장에서의 작업량을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 프리캐스트 콘크리트 부재는 양질로 만들어져 건물의 외관에 사용할 수 있고 재사용할 수 있는 경제적인 이점도 있다.

그러나 프리캐스트 콘크리트 부재로 시공을 할 경우 부재간의 접합이 어렵고 성능에 대한 확신이 부족하여 국내에서는 제한적으로 사용하고 있다. 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합방법은 <그림 1>과 같이 습식 공법을 도입하여 시공하였으나 연결부 부실로 인하여 충분한 일체화가 이루어지지 않아 방수해지가 발생하는 등 문제가 발생하였다.

특히 지진 지역에서는 접합부의 강도뿐만 아니라 연성능력을 확보할 수 있는 PC 연결부가 요구된다. 이에 따라서 국외에서는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥의 접합 방법으로 포스트텐션 연결부, hybrid 연결부, DDC(dywidag ductile connection)등 다양한 접합방식을 연구해 왔다. 이들 접합방식은 구조 성능이 좋은 반면, 연결부의 제작성, 시공성이 낮고 비용이 많이 드는 등

우리나라와의 제반 건설 환경의 차이로 인하여 이러한 선진 공법의 도입이 지연되고 있다.

본고에서는 국외에서 내진접합부로서 사용되고 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합 방식의 종류와 특징을 실험결과에 기초하여 기술하고자 한다.

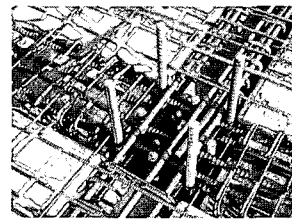


그림 1. PC 습식접합 공법



그림 2. DDC 시스템으로 시공한 파라마운트 빌딩 (2001년)

2. PC 접합부에 대한 기존 연구

2.1 개요

프리캐스트 콘크리트(precast concrete)란 공장 또는 현장에서 건설전에 미리 제작 및 양생된 철근 콘크리트 부재의 총칭이

* 정희원, 서울대학교 건축공학과 교수

** 우림산업개발(주) 부사장

*** 정희원, 동국대학교 건축공학과 교수

며, 건축 부재로서는 기둥, 보, 벽판, 바닥판, 지붕판 등이 있고, 이 부재들을 써서 현장에서 조립한 구조를 프리캐스트 콘크리트 구조(precast concrete structures)라 한다. 프리캐스트 콘크리트 부재로서 큰 스패 또는 큰 활하중 등을 받는 부재를 만들 때에는 콘크리트의 인장응력이 생기는 부분에 미리 압축력을 가하여 콘크리트의 인장강도를 증가시켜 부재의 휨 저항을 증대하도록 하는 프리스트레스트 콘크리트(prestressed concrete)를 사용한다. 프리캐스트 콘크리트 구조는 2차 세계대전 후 유럽, 특히 동구권을 중심으로 발달하였으며, 1950년대에는 일본에, 1960년대에는 우리나라에도 기술이 도입되어 초기에는 아파트 등의 중·저층 건물에 주로 이용되었으며, 경제성, 시공성, 공기 단축 등의 여러 가지 이점 때문에 고층건물에도 일부 채택되고 있다. 특히, 미국에서는 프리캐스트콘크리트학회(Precast Concrete Institute)를 중심으로 많은 연구가 이루어졌다. 주 연구 내용은 프리캐스트 콘크리트 부재를 접합하는 접합부의 역학적 거동의 규명과 PC 골조 형식을 발전시키는 것이었다.

접합부의 거동에 대한 대표적인 연구로서 L. S. Johal, N. W. Hanson과 D. M. Schultz에 의한 압축접합부 실험, R. F. Mast, A. W. Mattock에 의한 전단전달 연구, N. W. Hanson, H. G. Harris, Harry R. Foerster, S. D. Huey에 의한 마찰저항, 접착력, 장부작용, 전단기의 전단강도 연구 등이 수행되어 왔다. 최근에는 지진지역에서의 사용에 많은 제한이 있어 왔던 프리캐스트 구조물의 단점을 보완하기 위하여 내진성능이 취약한 보-기둥 접합부의 연성도 확보 및 내진성능 증가를 위한 많은 실험연구가 진행되어 왔다. 특히 미국-일본 공동연구의 일환으로 1991 ~ 2000년에 걸쳐 수행된 PRESS(Precast Seismic Structural Systems) 프로그램에서 5층 프리캐스트 빌딩에 대한 실험연구가 수행되었는데, Nakaki 등에 의해 수행된 이 실험 연구는 다양한 골조 접합부 및 시스템의 지진거동을 규명하였으며, 빌딩 구조물에 대한 프리캐스트 구조의 우수한 내진성능을 증명하였다.

2.2 프리스트레스트(Prestressed) 접합방법

PC 접합부의 결합력을 증가시키고 내진성능을 확보하는 방법으로서 포스트텐션 공법을 사용할 수 있다. 연속되어 있는 보, 기둥과의 접합부를 관통하여 덕트를 매설한 후 보와 기둥 사이의 접합면에 완전 밀착을 위하여 에폭시로 충전한다. 긴장재를 삽입하고 긴장작업이 완료된 후에는 덕트와 긴장재 사이를 그라우트로 채워서 콘크리트와 긴장재를 일체화 하여 완전부착(fully bond) 시킨다.

(그림 3)은 완전부착 프리스트레스트 강연선(prestressed strands)을 사용한 보단면을 나타내고 있다. 보-기둥 접합면에서 휨모멘트는 긴장재의 인장력에 의하여, 그리고 전단력은 축압

력에 의한 마찰에 의하여 전달된다. 이와 같이 완전부착 긴장재를 사용하면 일체식 철근콘크리트구조(monolithic reinforced concrete subassemblages)에 비해 연성(ductility)과 휨강도는 향상되나, 낮은 변형에서는 과도한 강성 감소가 발생한다. 그 이유는 완전부착 긴장재가 비탄성 변형이 발생하여 압축력에 의한 축압력(clamping force)이 감소되기 때문이다.

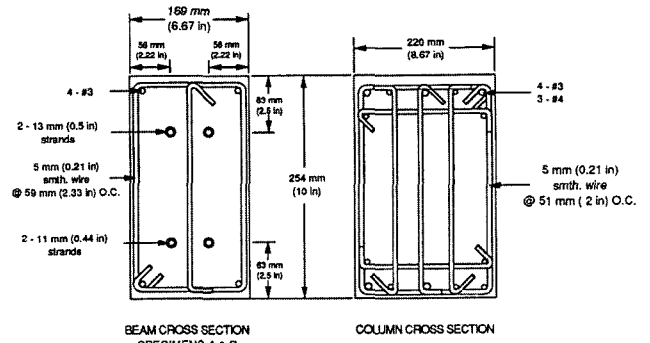


그림 3. fully bonded prestressed strands

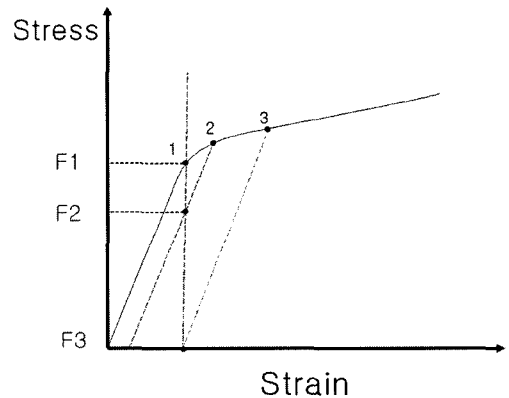


그림 4. prestress loss due to inelastic response

이러한 거동 양상은 일반적인 PC 강선의 응력-변형률(stress-strain)곡선을 나타내는 (그림 4)에서 설명할 수 있다. 포스트텐션 접합방법에서는 별다른 전단 전달기구 없이 포스트 텐션에 의하여 도입되는 축압력에 의해 전단력이 전달된다. 완전부착의 경우에는 휨모멘트가 가장 큰 보의 단부에서 긴장재의 변형률이 급격히 증가한다. 이로 인해 긴장재의 변형률이 비탄성영역에 도달하여 제하(unloading)하면 동일한 변형률에 대하여 인장력이 F1에서 F2로 감소한다. 더 큰 비탄성 변형이 가해지면 긴장력이 완전히 손실된다. 그 결과 프리스트레스에 의한 보-기둥면의 전단 마찰력이 손실되어 중력하중을 견디지 못하게 된다. 또한 이로 인하여 하중-변형 이력곡선에서 지나친 편칭 현상도 나타나게 되어 에너지 소산능력이 일체식 구조에 비해 크게 저하된다.

포스트텐션 강봉 대신 PC 연선을 사용하면 강성이 더 좋고 조금 더 높은 층간변위에서 파괴가 일어났으며 에너지 소산량(energy dissipation capacity) 또한 증가하였다.

비탄성 변형을 줄이기 위해 프리스트레싱 긴장재를 보의 중앙으로 집중시킬 수 있다. 상하의 긴장재가 중앙에 집중되므로 모멘트 강도는 줄어들지 않고 오히려 실제로 연구 결과 프리스트레싱 긴장재가 중앙에 집중될수록 접합부의 안전성을 나타내는 self-centering이 향상되고 변형률도 줄어든다. 보다 큰 변형에서도 탄성을 유지할 수 있어 축압력도 향상되었다. 그러나 긴장재가 인장 상태에 머물게 되므로 에너지 소산 능력은 감소한다.

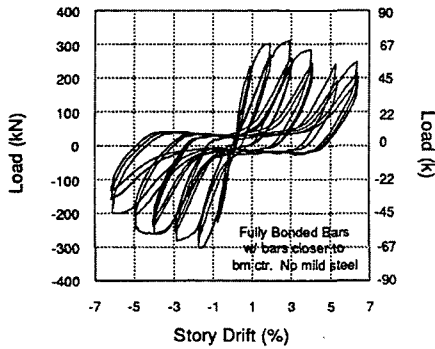


그림 5. hysteresis curves for fully bonded post-tensioned bar

그러나 이 경우에도 여전히 긴장재 탄성력의 손실을 완전히 방지할 수는 없다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 부분부착을 사용하는 방법이 개발되었다. 부분부착에서는 덱트와 긴장재 사이를 그라우트 작업을 하지 않고 긴장재가 덱트 사이에서 자유롭게 움직일 수 있도록 접합부 부분에 부착을 사용하지 않는다.

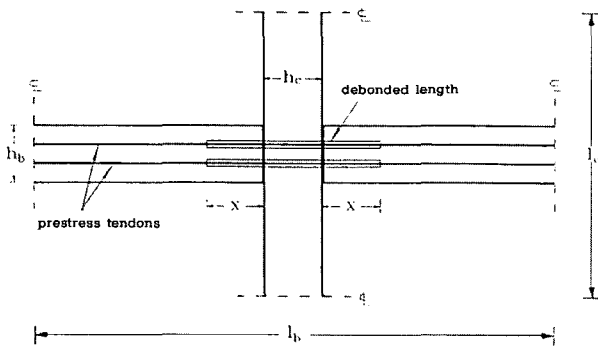


그림 6. partially bonded tendon

부분부착 긴장방법의 특징은 다음과 같다.

- ① 높은 축압력을 유지할 수 있다. 비부착(debonding) 길이를 적절히 선택하면 프리스트레싱 스틸의 탄성범위를 초과하지 않고 요구되는 극한 변형을 겪을 수 있다. 완전부착 긴장재와 달리 제하 시 프리스트레싱의 손실이 적으며 그로 인해 기둥과 보의 접합면의 전단파괴력이 유지될 수 있으므로 중력하중 및 횡하중에 의한 전단력을 견딜 수 있다.
- ② Self-centering 기능을 한다. 포스트텐션닝 긴장재가 탄성영역에서 변형이 일어나므로 큰 변위(drift)에서도 잔류변

형 없이 원위치로 돌아가는 self-centering 작용을 하며 최초 강성이 회복된다. 따라서 구조물의 리해빌리테이션(rehabilitation)에 기여할 수 있다.

- ③ 연성능력이 향상된다. 비부착으로 인하여 접합부 콘크리트에 균열 손상으로 인한 강도저하가 억제되며 보-기둥 접합부의 연성능력이 향상된다.

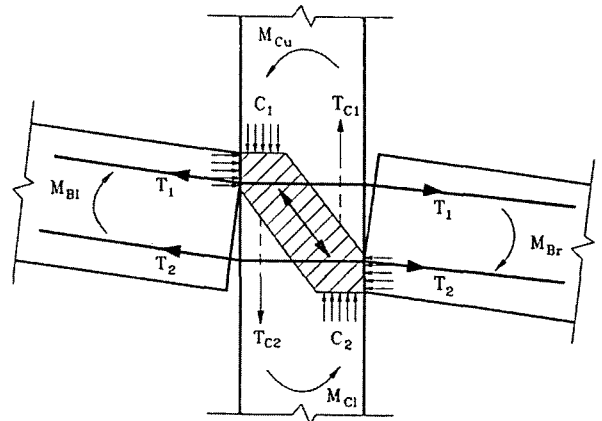


그림 7. forces contributing to joint shears with partially debonded prestressing tendons

- ④ 접합부 설계와 시공이 단순하다. 전체 수평 전단력이 <그림 7>과 같이 대각 압축 스트럿(diagonal compression strut)에 의해 전달되기 때문이다. 수평 보강이 필요 없게 되고 접합부에서 전단력에 대한 특별한 수직보강 또한 필요 없다.

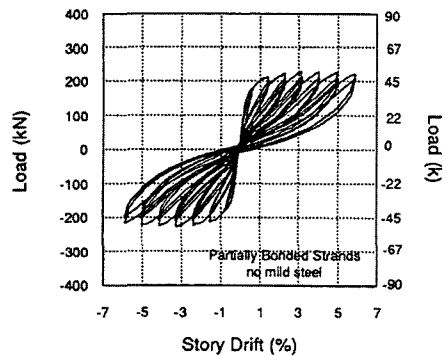


그림 8. hysteresis curves for partially bonded strands

- ⑤ 에너지 소산 능력이 좋지 않다. <그림 8>에 나타나듯이 에너지 소산능력은 완전부착 긴장재를 사용한 접합부보다 좋지 않다. 긴장재가 탄성영역에만 존재하므로 에너지 소산이 일어나지 않는다.
- ⑥ 보단부에 압축보강이 필요하다. 콘 병형 발생 시 완전 부착 접합부보다 보-기둥 접합면 사이에 큰 opening이 생기고 보의 단부 부분에 높은 압축변형이 예상되기 때문에 보단부의

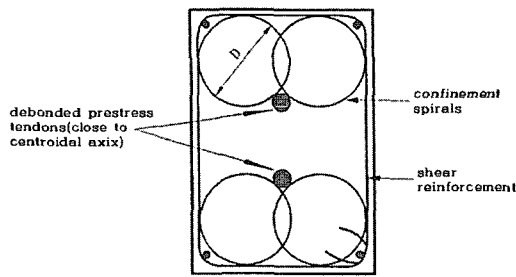


그림 9. interlocking spiral

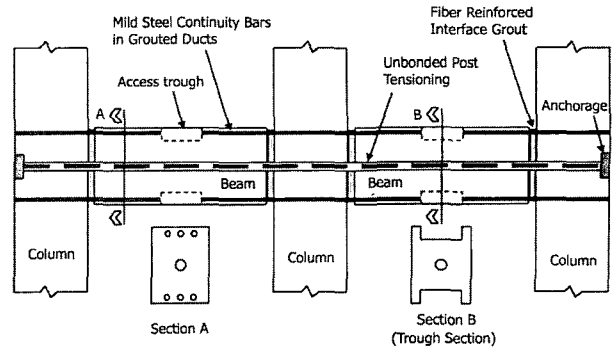
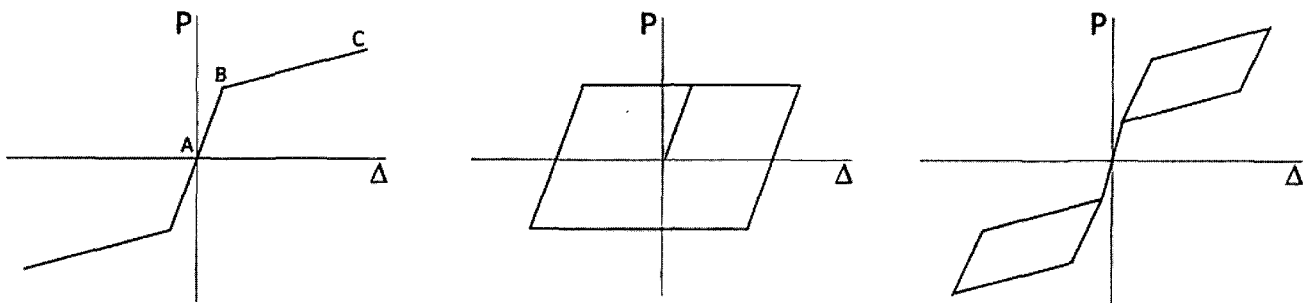


그림 10. hybrid connection



a. frame with PT steel alone(Nonlinear elastic connections)

b. mild steel

c. hybrid frame

그림 11. force-displacement relationship of hybrid connections

보강을 위하여 <그림 9>와 같은 interlocking spiral을 설치하여야 한다.

2.3 Hybrid Connection

Hybrid Connection은 NIST에서 주관하는 PRESSS Program에 의해 개발 되었다. Hybrid Connection은 일체식 구조와 모든면에서 거의 비슷한 성능을 발휘하고 어떤면에서는 그 이상의 성능을 발휘하는 것으로 입증되었다.

Hybrid Connection은 단면의 중앙 부분을 관통하는 비부착 긴장재(unbonded post-tensioning tendons)에 의해 접합이 된다. 긴장재는 보단면 중앙부에 위치하여 보의 에너지 소산능력을 향상시키기 위해 보의 단면 위아래에 홈통(trough)을 설치하여 이곳을 통해 보의 상하부에 기둥을 관통하는 일반철근이 삽입 된다. 이 접합부는 구조체의 변형이 보와 기둥의 접합부에서 집중되도록 유도한다.

포스트 텐션 긴장재(tendons)는 강연선(strand)이 더 높은 항복 변형률(yield strain)과 큰 인장 변형 하에서 탄성을 유지하는 점 때문에 고강도 강봉(high strength bar)보다 더 효과적이다. 긴장재의 변형이 한부분에서 일어나는 응력집중을 피하기 위해 비부착 구간(unbonded region)을 설치하여 항상 탄성상태가 되도록 설계 되어야 한다. 또한, 보의 회전에 의해 발생하는 변형을 최소화하기 위해 보 단면의 중앙부분에 강연선을 위치하였

고 그로 인해 포스트텐션 강연선이 큰 변형 발생 시 잔류변형 없이 탄성복원력(elastic restoring force)을 유지하고 중력하중과 지진 전단력에 저항할 수 있는 압축구속력(clamping force)을 유지할 수 있게 하였다.

접합부 상하부에 설치되는 일반철근은 주기거동 시 압축력과 인장력을 받으며 항복이 일어나며 에너지를 소산한다. 또한, 전단력과 휨력에 대한 부가적인 지지력을 발휘한다.

Hybrid connection의 하중-변형 관계가 <그림 11>에 나타나 있다. 그림에 (a) 긴장재(PT steel)의 비선형 탄성거동과 (b) 일반철근의 탄소성 거동이 합쳐져 (c)와 같은 관계를 나타내게 된다.

Hybrid connection의 특징은 다음과 같다.

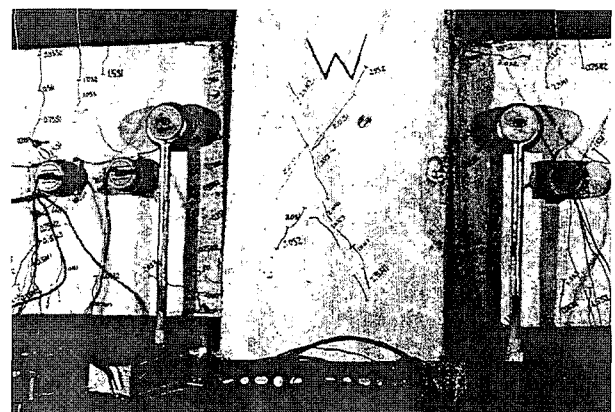


그림 12. 3.4% story drift에서 파괴형상

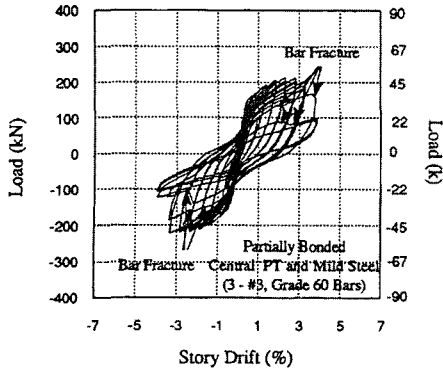


그림 13. hysteresis curves for hybrid connection

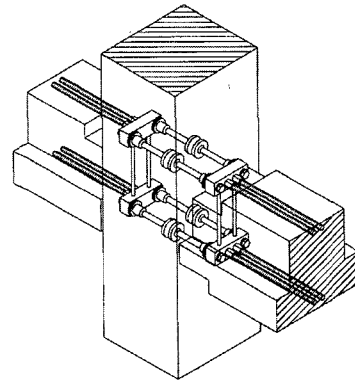


그림 14. Dywidag Ductile Connection

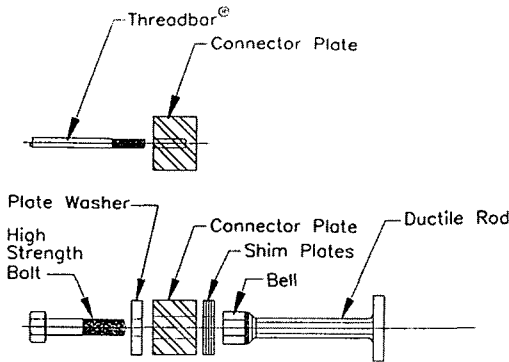


그림 15. hardware of DDC

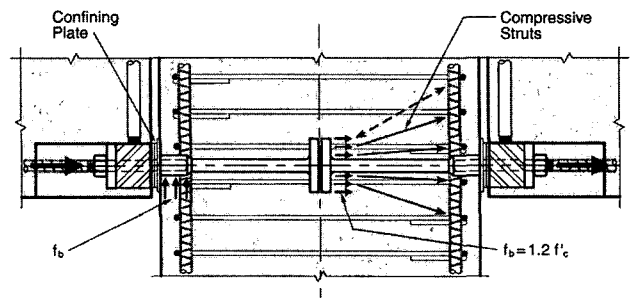


그림 16. shear transfer mechanism

- ① Hybrid connection은 큰 변형에서 구조적 손상이 적다. 긴장재는 탄성상태이고 일반철근은 덕트에 그라우트되어 둘러싸고 있는 콘크리트를 손상시키는 것을 막아준다.
- ② 지진 하중이 작용한 후에도 포스트 텐션닝 강연선에 의해 잔류변형 없이 self-centering 기능을 할 수 있다. <그림 12>를 보면 3.5% 변위(drift)에서 구조체가 거의 손상되지 않았음을 알 수 있다.
- ③ 긴장재가 탄성상태이므로 초기강성(initial stiffness)이 높고 따라서 하중에 의한 처짐을 감소시킬 수 있다.
- ④ 운반과 시공이 쉽고, 포스트 텐션닝 강연선 외에 별도의 접합 철물이 없으므로 외관이 깔끔하다.
- ⑤ 다소 시공이 복잡하며, 에너지 소산 능력이 일체식 구조에 비해서 작다.

2.4 DDC 시스템(Dywidag Ductile Connection)

DDC 시스템은 Dywidag사에 의하여 1980년대에 개발되어 PRESSS와 NIST의 실험에서 그 효율성이 검증된 방법이다. DDC 시스템 공법은 Beam Transfer Block을 통하여 보와 기둥을 볼트 접합으로 간편하게 시공할 수 있으며, 기둥 내에 Ductile Rod를 삽입하여 기존의 보 단부에서 철근의 항복이 일어나는 것과 달리 기둥 내에서 철근의 항복이 일어나도록 유도한 것을 특징으로 한다. 볼트접합으로 시공이 매우 간편하고, 연성

능력이 우수하며 콘크리트에 작용하는 피해를 최소화할 수 있다. DDC는 ductile rod가 전체 시스템 중 가장 약한 부분임과 동시에 가장 중요한 요소이다. 시스템의 모든 변형이 ductile rod에서 발생하므로 ductile rod는 강도와 연성능력 등의 특성들을 만족하기 위해 양질의 연성 강재로 제작한다. <표 1>에 ductile rod와 A706 steel의 재료적 특성을 비교하였다. ductile rod가 항복강도는 낮지만 신장능력(elongation)과 인장강도는 높음을 알 수 있다.

표 1. material properties of ductile rod

Property	Ductile rod	A706 steel
Yield strength, minimum	50 ksi	60 ksi
Yield strength, maximum	1.10 F _y	1.36 F _y
Tensile strength	1.50 F _y	1.30 F _y
Elongation	35% in 2in	10% in 8in

기존의 일체식 구조는 전단력이 두 가지 메커니즘에 의해 접합부를 통해 전달된다. 기둥의 콘크리트에서 압축 스트럿에 의해 대각선 방향으로 전달되는 방법과 콘크리트에 균열이 발생한 후 트러스 메커니즘에 의해 전달되는 방법이다. DDC는 ductile rod가 접합부 중앙에 정착되어 있어<그림 16> 대각 압축 스트럿(diagonal compression strut)에 의한 하중 전달이 불가능하고 단지 트러스 메커니즘에 의해서만 전달된다.

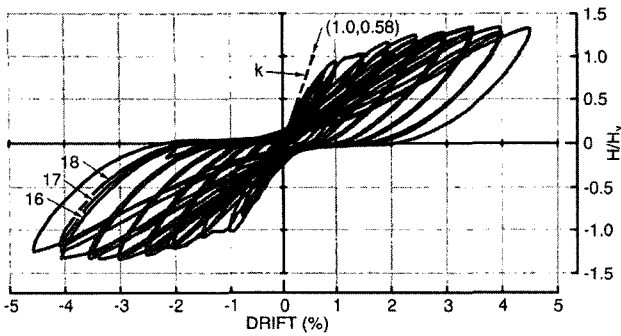


그림 17. hysteresis curves for DDC

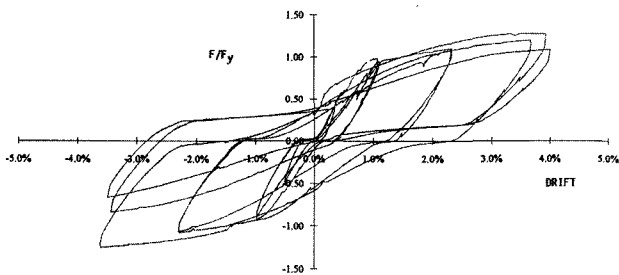


그림 18. hysteresis curves for monolithic frame

DDC 시스템의 특징은 다음과 같다.

- ① 보와 기둥을 볼트에 의해서 간편하고 빠르게 접합할 수 있고 볼트체결로 모든 구조적인 접합이 완성되어 용접과 그라우트가 필요 없으므로 간편하다.
- ② Ductile rod의 사용으로 연성이 좋다. <그림 17, 18>을 비교해보면 NIST의 일체식 구조보다 더 높은 변형능력을 나타내고 있음을 알 수 있다.
- ③ 연성능력이 우수하여 높은 변위(drift)에서 접합부에 균열이 거의 발생하지 않아 콘크리트에 작용하는 피해를 최소화 할 수 있다.

④ 제품의 제작이 어렵고 비용이 비싸며 시공의 정밀도가 요구되는 단점이 있다.

3. 맺는말

본고에서는 국외에서 연구된 포스트텐션 접합, Hybrid 접합, DDC(Dywidag Ductile Connection)등 PC 내진 접합부에 대하여 소개 하였다. 외국에서는 PC 골조 시스템에 대한 다양한 연구를 바탕으로 하여, PC 골조를 이용한 오피스·주거 건물의 건설이 점차 고층화 대형화되어 가고 있다. 앞에서 기술한 다양한 접합방법 고려하여 우리나라 건설 환경에 적합한 경제적이고 시공이 간편하며, 강도 및 연성능력 등 구조성능을 확보할 수 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합 방식이 연구개발되어야 할 것이다. □

참고문헌

1. Nakaki, Suzanne Dow, Englekirk, Robert E., and Plaehn, Juergen L., "Ductile Connectors for a Precast Concrete Frame," PCI JOURNAL, Vol.39, No.5, Sep.~Oct. 1994, pp.46~59.
2. Priestley, M. J. Nigel. and Tao, Jian Ren, "Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames With Partially Debonded Tendons," PCI JOURNAL, Vol.38, No.1 Jan.~Feb., 1993, pp.58~69.
3. Cheok, G. S., and Lew, H. S., "Model Precast Concrete Beam-to-Column Connections Subject to Cyclic Loading," PCI JOURNAL, Vol.38, No.4, Jul.~Aug., 1993. pp.80~92.
4. Stanton, J. F., Stone, W. C and Cheok, G. S. "A Hybrid Reinforced Precast Frame for Seismic Regions," PCI JOURNAL Vpl.38, No.2, Mar.~Apr., pp.20~32.

신간소개 - "콘크리트구조 재료공학"

◆ 소개

:이 책은 지금까지의 재료공학 분야의 책들보다 더 나아가, 신도시 아파트 구조물의 안전진단에서 지적된 구조물의 균열패턴과 더불어 그 원인을 명확하게 설명했을 뿐만 아니라 구조물에 발생하는 균열의 형태를 거의 빠짐없이 다루었고, 이와 동시에 이미 건설된 콘크리트재료를 채취하여 얻은 토막에서 콘크리트를 구성하는 각 성분량을 계산하는 방법 등 지금까지 할 수 없었던 새로운 내용도 수록하였다.

(머리말 中)

- 저 자 : 정일영
- 출판사 : 기문당
- 발행일 : 2004년 09월 05일
- 정 가 : 25,000원
- 페이지 : 553
- ISBN : 89-7086-628-0

