Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 18, No. 4, pp. 497~506, August, 2006

# 반복하중을 받는 프리캐스트 콘크리트 건식 보-기둥 연결부의 거동분석

송형수[1] · 유승룡[2]*

[1]동국대학교 토목환경공학과, [2]동국대학교 건축공학과

# Analysis on the Behaviors of Precast Concrete Beam-Column Connections Subject to Cyclic Loading

**Hyung-Soo Song[1] and Sung-Yong Yu[2]**

[1] Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

[2] Dept. of Architectural Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

**ABSTRACT** The precast concrete beam-column connectors for the high-rise office buildings were investigated experimentally in this study. The specimens of general precast beam-column connector which is used in a domestic site, specimen of DDC(dywidag ductile connectors) of Germany, and specimen of DDC with post-tensioning and modified DDC with post-tensioning were constructed and tested to verify the safety. The DDC with and without post-tensioning showed reliable joint strength and ductility but failed in critical inclined shear crackings at the column. The modified one showed better behaviors in tests because they did not show critical column crackings at failure. The use of prestressing did not helpful significantly to increase the strength and ductility of connectors but helpful only to develop self-centering behavior for stability.

**Keywords** precast concrete, beam-column joint, dywidag ductile connection, cyclic loading

## 1. 서 론

현재까지 가장 일반적으로 사용되고 있는 철근콘크리트 구조는 습식공법으로 현장에서 모든 작업이 이루어지게 되어, 많은 인력이 필요하게 되는 특징이 있다. 오늘날 사회적으로 건설현장을 기피하는 현상으로 인하여, 건설현장의 인력부족은 공사 품질의 저하와 공기지연 등의 문제를 유발하고 있다. 철근콘크리트 구조와 함께 일반적으로 사용되는 구조형식인 철골 구조는 경제성과 소음 및 진동 등의 문제점을 갖고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 가장 경제적이고, 합리적인 대안은 현장작업을 최소화하고 공사 품질을 보장할 수 있으며, 공기를 단축시킬 수 있는 프리캐스트 콘크리트(precast concrete) 를 활용한 조립식 공법이라 할 수 있다.

현재 국내에서의 프리캐스트 보-기둥 연결부는 부재간 연결의 어려움으로 인하여, 보와 기둥은 공장형 프리캐스트 콘크리트로 제작하고, 연결부는 현장에서 콘크리트를 타설하여 연결시키는 방법이 일반적으로 사용되어 왔다. 이러한 방법은 습식공법을 부분적으로 도입한 방법으로서, 프리캐스트 콘크리트의 공법을 효율적으로 적용하지 못하는 단점이 있다. 한편 프리캐스트 콘크리트 공법의 장점을 극대화할 수 있는 국외의 건식공법에 의한 보-기둥 연결 방법은 미국 샌프란시스코의 파라마운트 빌딩에 이미 적용되어, 구조성능에 대한 검증은 이미 이뤄진 상태이지만, 경제성, 시공성 등이 국내 건설여건상 국외의 공법을 직접 적용하기에는 어려운 실정이다. 그러므로 국내의 건설현장에 적용 가능한 건식공법에 의한 보-기둥 연결방법의 개발 필요성이 높아지고 있다.

본 연구에서는 국내의 주상복합건물 및 고층빌딩에 적용 가능한 건식공법에 의한 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부를 개발하고자 현재의 국내 · 외에 적용되고 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부 시험체와 개선된 보-기둥 연결부 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체를 반복하중 재하실험을 통하여 연결부의 거동 및 연성능력을 평가하고자 하였다.

*Corresponding author E-mail : ysy@dgu.ac.kr
Received November 7, 2005, Accepted June 30, 2006
©2006 by Korea Concrete Institute

## 2. 연구 내용

### 2.1 국내 · 외 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결방법

국내에서 일반적으로 사용되고 있는 완전고정 연결방법은 주차장, 매장, 아파트형 공장 등에 일반적으로 활용되고 있는 보-기둥 연결방법이다. 이 연결방법은 지금도 일본과 뉴질랜드에서 사용되고 있는 방법이지만 미국에서는 더 이상 사용되지 않는 연결부이다. 이 연결부의 단

점은 기존의 철근콘크리트 연결방법에 비해서 고비용을 요구하고, 건식과 습식공법의 혼합으로 인한 공정이 복잡해지고 공기 단축이 어렵다는 문제점이 있다. 단순 연결방법도 국내 현장에서 사용되고 있지만, 횡력에 대한 구조안전성 확보에 취약하여 저층구조물에만 사용되고 있다.

기존 국외에서의 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부의 사용은 내진성능에 대한 취약점 때문에 일체형 철근콘크리트 보-기둥 연결부에 비하여 매우 제한적으로 사용되어왔다. 그러나 최근에는 프리캐스트 콘크리트 구조물의 단점을 보완하기 위하여 내진성능이 취약한 보-기둥 연결부의 연성도 확보 및 내진성능 증가를 위한 많은 실험 연구가 진행되어 왔다. 1980년대에는 Pillai and Kirk[1], Bhatt and Kirk[2]에 의하여 용접을 이용한 프리캐스트 콘크리트의 보-기둥 연결공법에 대한 연구가 이뤄졌다. 특히 미국-일본 공동연구의 일환으로 1991~2000년에 걸쳐 수행된 PRESSS(precast seismic structural system) 프로그램에서 5층 프리캐스트 빌딩에 대한 실험연구가 수행되었는데, Nakaki et al[3].에 의해 수행된 이 실험연구는 다양한 골조 연결부 및 시스템의 지진거동을 구명하였으며, 빌딩 구조물에 대한 프리캐스트 콘크리트 구조의 우수한 내진성능을 증명하였다[4]. 이러한 연구들을 통하여 프리스트레스트 연결공법, 하이브리드(hybrid) 연결공법, DDC 시스템 공법 등이 소개되었다.

프리스트레스트 연결공법은 프리캐스트 콘크리트 연결부의 결합력을 증가시키고 자가조정(self-centering) 현상이 일어나며, 내진성능을 향상시킨 공법이다. 그러나 보-기둥 연결부를 관통하는 덕트를 매설하고 그 안에 긴장재를 삽입하는 등의 시공과정이 매우 복잡하며, 현장에서 포스트텐션을 도입하기 위한 별도의 장비와 기술이 요구되어 경제성이 떨어지는 단점이 있다.

하이브리드(hybrid) 연결공법은 일체식 구조와 유사한 성능을 발휘할 수 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결방법으로 NIST(national institute of Standards and Technology)에서 주관하는 PRESSS 프로그램에 의해 개발된 공법이다. 그러나 프리스트레스트 연결공법과 마찬가지로 덕트 매설, 긴장재 삽입 및 포스트텐션 도입 등의 시공과정이 복잡하여, 약진지역인 국내의 여건상 적합하지 않은 공법이다.

DDC(dywidag ductile connection) 시스템 공법은 Dywidag사에 의해서 개발된 공법으로서, PRESSS 프로그램에서의 실험에서 그 효율성이 검증된 공법이다. 실용화 연구는 Englekirk[5]에 의하여 이뤄진 공법으로, 기둥 내에 덕타일 로드(ductile rod)를 Fig. 1과 같이 삽입하여 보와 기둥을 볼트체결로 모든 구조적인 연결을 간편하고 빠르게 연결할 수 있으며, 또한 기존의 프리캐스트 콘크리트 연결방법에 비하여 연성능력이 뛰어난 장점이 있다. Englekirk[6]의 보고에 의하면 DDC 시스템 공법의 우수한 성능으로 인하여, 기존의 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부에서 적용되지 못하였던 고층구조물인 층고가 39층인 미국 샌프란시스코의 파라마운트 빌딩에 적용되었다. 반면에 DDC

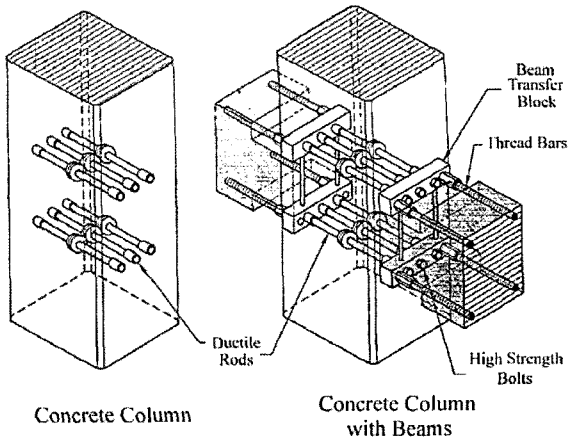


**Fig. 1** Isometric view of a ductile connector[5]

시스템 공법은 시공 시 정밀도가 요구되고, 덕타일 로드(ductile rod)를 사용함으로써 형태와 크기에 제약이 있으며, DDC 시스템에 사용되는 철물 부품의 비용이 고가인 단점이 있다.

### 2.2 실험 개요

본 연구에서는 국내 건설현장에 프리캐스트 콘크리트 건식 보-기둥 연결공법의 적용가능성 여부를 평가하고자 시험체를 다음과 같은 목적으로 제작하였다.

· 현재 국내활용 프리캐스트 콘크리트 공법과 비교한 적용성 시험체

· DDC 시스템 공법을 국내의 여건에 따라 적용하기 위한 시험체

· 프리스트레스트 연결공법의 포스트텐션 공법겸용을 위한 대체 시험체

시험체는 국내에서 현재 활용되고 있는 프리캐스트 콘크리트 연결부 시험체, DDC 연결부 시험체, DDC 연결부에 포스트텐션을 도입한 시험체와 철근 압착공법에 포스트텐션을 도입한 시험체로 4가지 시험체를 제작하였다. 현재 국내에서 활용되고 있는 시험체인 PBC 1을 제외한 3개의 시험체의 보 단부에는 철제블록(transfer block)을 적용하였다. 철제블록(transfer block)은 보의 단부에 설치되어, 기둥의 연결철물과 보의 주철근을 연결하는 연결부 역할을 하며, 양 보로부터 전달되는 인장력과 압축력을 지압으로서 기둥에 전달하는 역할을 한다. 한편 PBC 3, 4 시험체에는 보-기둥 연결부의 결합력과 내진성능을 확보하고자 포스트텐션(post-tension)을 보의 중앙부에 도입하였다. 이러한 보 중앙에 포스트텐션의 도입은 박홍근 등[4]의 보고에 의하면, 연결부의 안전성을 나타내는 자가조정(self-centering)이 향상되고, 변형률도 줄어드는 것으로 보고하고 있다.

프리캐스트 콘크리트의 설계기준강도는 35 MPa, 토핑콘크리트의 설계기준강도는 27 MPa을 사용하였다. 각 시험체의 연결부 특성은 Table 1과 같고, 시험체의 특성은 다음과 같다.

**Table 1** Properties of test specimens

| Specimen | Connecting bar | Column | Beam |
|---|---|---|---|
| PBC 1 | Upper : 2-D32, D35(hook)<br>Lower : 2-D32, D35(hook) | 762×600 | 360×600 |
| PBC 2 | Upper : 2-Ductile rod<br>Lower : 2-Ductile rod | 762×600 | 360×600 |
| PBC 3 | Upper, Lower : 2-Ductile rod<br>Post-tension strand(10-12.7 mm) | 762×600 | 360×600 |
| PBC 4 | Upper, Lower : 2-E32<br>Post-tension strand(10-12.7 mm) | 762×600 | 360×600 |

### 2.2.1 PBC 1

PBC 1 시험체(Fig. 2)는 국내에서 주차장, 매장, 아파트형 공장 등에 일반적으로 활용되고 있는 유일한 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부이다. 이 연결부는 습식과 건식을 병용하여 사용하는 연결방법이며, 기존의 철근콘크리트 연결부에 비해 경제성이 떨어지고, 습식을 병용하게 되어 완전건식공법에 비하여 공기가 지연되는 단점이 있다.

### 2.2.2 PBC 2

PBC 2 시험체(Fig. 3)는 Englekirk[3]가 제안하는 DDC 시스템 연결부를 국내 실정에 따라 제작한 시험체이다. 기둥 내에 덕타일 로드(ductile rod)를 삽입하고, 보의 단부에는 보의 주철근을 연결시킨 철제블록(transfer block)을 설치하여 보와 기둥을 볼트 연결로 간편하게 시공할 수 있는 시험체이다.

### 2.2.3 PBC 3

PBC 2 시험체(Fig. 4)와 동일한 시험체에 포스트텐션(post-tension)을 적용한 시험체이다. 포스트텐션의 도입이 보-기둥 연결부에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

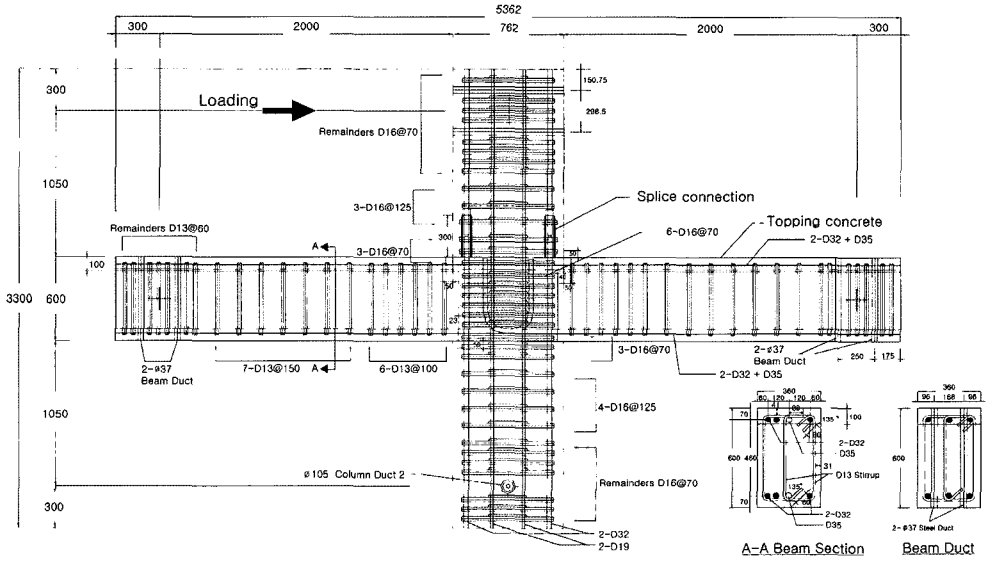


**Fig. 2** Basic details for specimen PBC 1

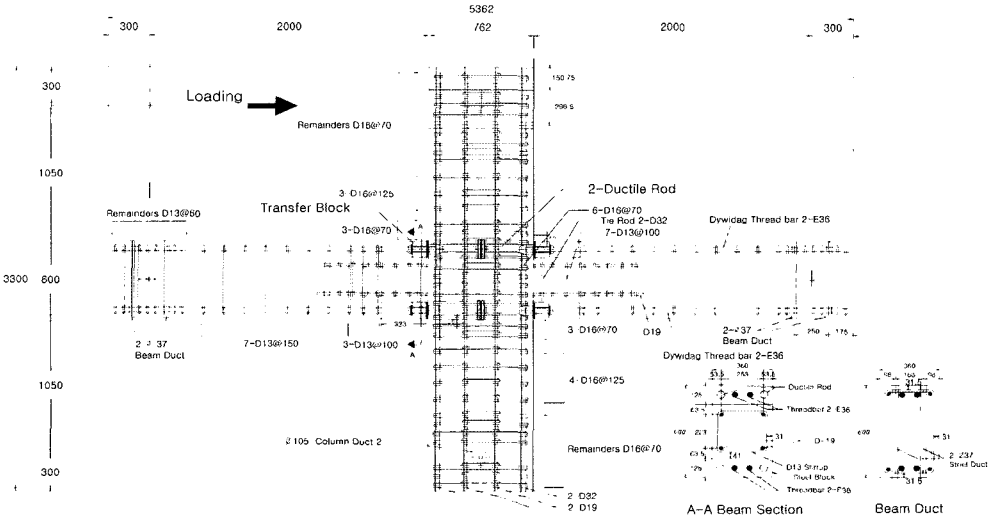


**Fig. 3** Basic details for specimen PBC 2

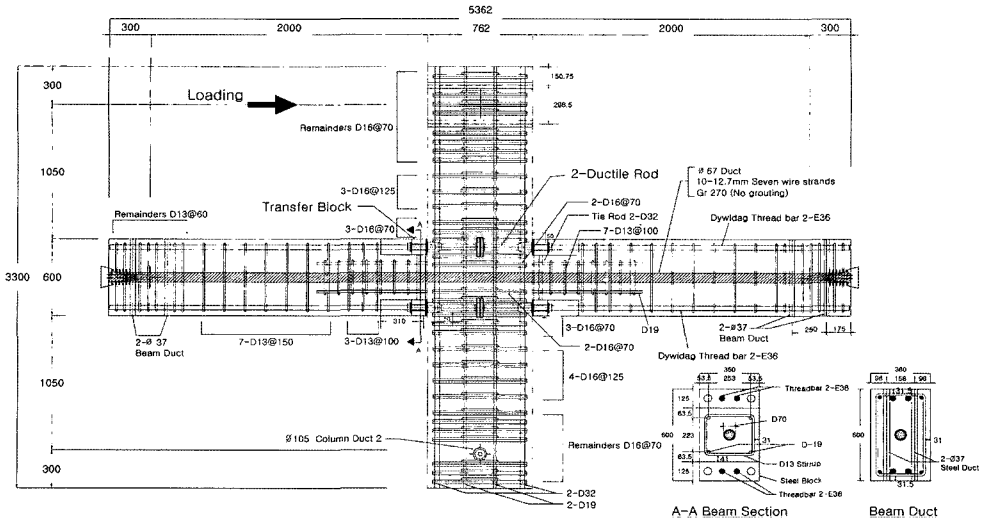


**Fig. 4** Basic details for specimen PBC 3

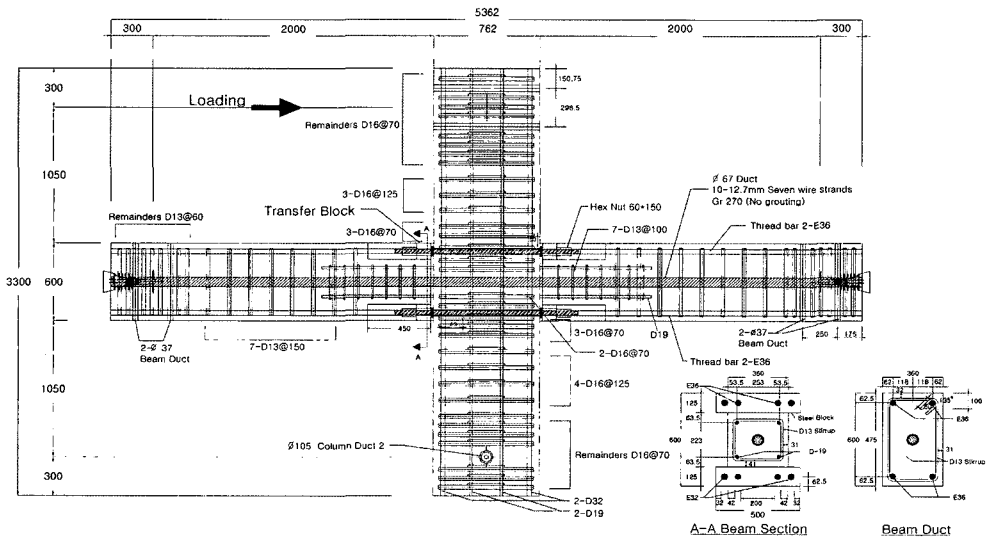


**Fig. 5** Basic details for specimen PBC 4

2.2.4 PBC 4

PBC 3 시험체(Fig. 5)와 유사한 연결부이지만 덕타일 로드(ductile rod) 대신에 고강도 봉(thread bar)을 사용함으로서, 덕타일 로드(ductile rod)의 형상이 없는 것이 상이하다.

### 2.3 재료 물성

시험체 제작에 사용된 연결부 연결철물의 역학적 특성은 Table 2와 같다. 또한 사용된 프리캐스트 콘크리트와 PBC 1에 사용된 토핑 콘크리트를 타설 시 KS F 2403에 따라 공시체를 제작하여 시험체와 동일한 조건에서 양생하였다. 이러한 공시체를 보-기둥 시험체의 실험 시 KS F 2405에 따라 측정하여 Table 3의 압축강도를 얻었다. 여기서 사용된 프리캐스트 콘크리트와 토핑 콘크리트의 배합비는 Table 4와 같다.

**Table 2** Mechanical properties of material

| | Area ($mm^2$) | Yield strength (MPa) |
|---|---|---|
| Reinforcing bar(D32) | 794.2 | 400 |
| Reinforcing bar(D35) | 956.6 | 400 |
| Thread bar(E32) | 804.0 | 823 |
| Ductile rod | 1,154.0 | 400 |
| Bolt(A490) | 1,139.0 | 877 |
| Low relaxation 7-wire strand(12.7 mm) | 98.7 | 1,890 |
| Transfer block | - | 490 |

**Table 3** Compressive strength test result

(Unit : MPa)

| Specimen | Precast concrete | Topping concrete |
|---|---|---|
| PBC 1 | 33.4 | 27.6 |
| PBC 2 | 37.9 | - |
| PBC 3 | 37.7 | - |
| PBC 4 | 47.7 | - |

※ Average of 5 tests

**Table 4** Mix proportion

| Specified concrete strength | Maximum size of coarse aggregate (mm) | Slump (mm) | S/a (%) | W/C (%) | Unit mass (kg/m$^3$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Water (W) | Cement (C) | Fine aggregate(S) | Coarse aggregate(G) | Super plasticizer(SP) |
| Precast concrete (35 MPa) | 25 | 80 | 40.0 | 41.5 | 128 | 469 | 724 | 1,079 | 4.69 |
| Topping concrete (27 MPa) | 25 | 80 | 40.5 | 46.0 | 134 | 385 | 736 | 1,144 | - |

### 2.4 실험 방법

시험체 설치는 기둥하단에 직경 100 mm의 강봉을 사용하여 회전변형을 유도하였고, 보의 양 단부는 Fig. 6에서와 같이 단부지지 철물을 설치하여 수직변형을 구속하는 형태로 유도하였다. 반복 횡 하중을 시험체에 재하하고자 변위용량이 ±250 mm인 1,960 kN Hydraulic actuator를 기둥 상부에 수평으로 Fig. 6에서의 위치에 부착하였다. 또한 실험 시 반복 횡 하중 재하로 인한 시험체를 지지하고 있는 바닥판의 미끄러짐을 최소화시키고자 20개의 유압볼트를 이용하여 플레이트를 유압에 의하여 바닥판에 고정시켰다. 하중재하 방식은 Fig. 7과 같은 변위제어방식으로 층간변위비(층간변위/기둥길이 비율, Story drift ratio)를 첫 번째 하중은 0.1%로 하고 그 이후 0.1%씩 증가시켰으며, 층간변위비가 1.0% 이후에는 층간변위비를 0.5%씩 증가시켰다. 각각의 층간변위비마다 3 사이클(Cycle)씩 반복 재하하였으며, 파괴에 이를 때까지 실험하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 파괴형상 및 하중-층간변위비 곡선

실험 결과 나타난 각 시험체의 하중-층간변위비 곡선은 Figs. 8~11과 같다. PBC 1 시험체는 층간변위비 1.0%에서 기둥의 스플라이스 연결부분에서 초기균열이 수평방

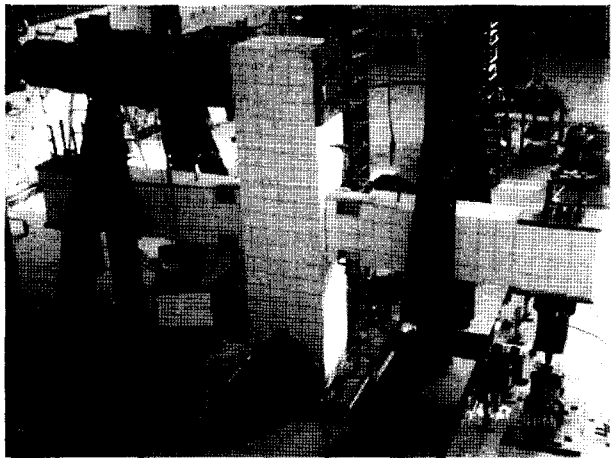

**Fig. 6** Photograph of test setup

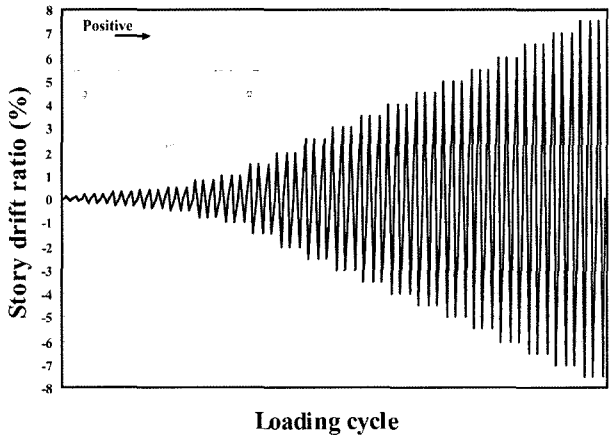


**Fig. 7** Loading pattern

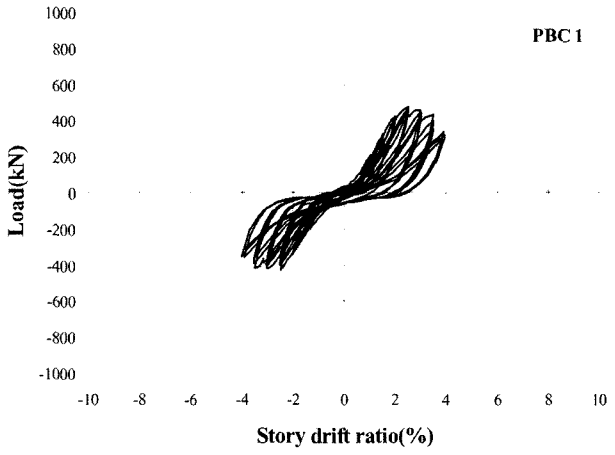


**Fig. 8** Load-displacement curves for PBC 1

**Fig. 9** Load-displacement curves for PBC 2

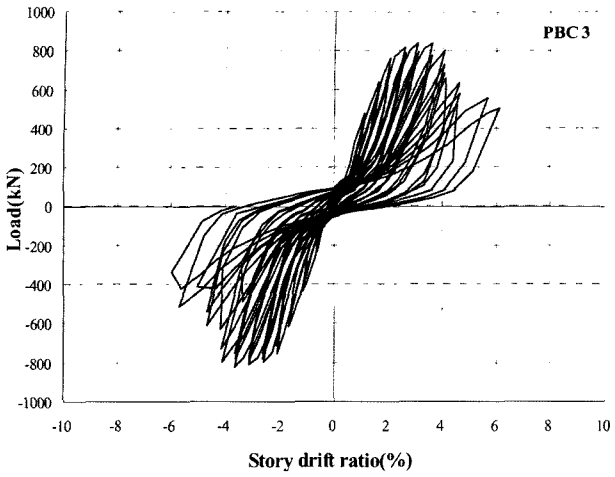


**Fig. 10** Load-displacement curves for PBC 3

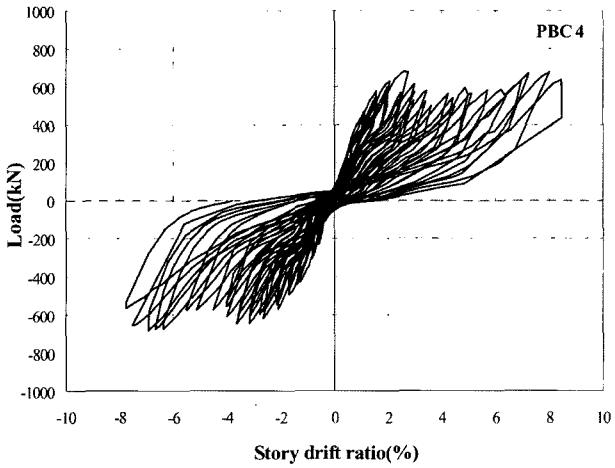


**Fig. 11** Load-displacement curves for PBC 4

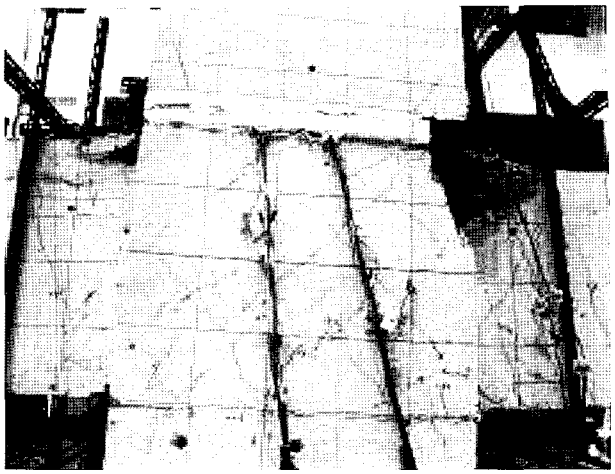

**Fig. 12** Failure of PBC 1

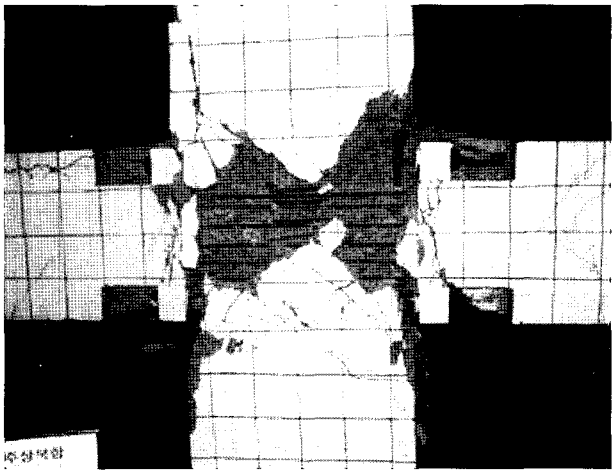

**Fig. 13** Failure of PBC 2

향으로 균열이 발생하였다. 이 연결부 균열은 프리캐스트 콘크리트 기둥과 보의 스플라이스 접합 시 고강도 스플라이스 모르타르로 그 계면(interface)을 접합하게 되는데, 이 적용된 스플라이스 모르타르가 실험 결과 40.3 MPa로 목표강도 60 MPa에 미치지 못하여 나타나는 현상으로 판단된다. PBC 1 시험체의 최대하중은 층간변위비 2.5%에서 발생하였으며, 최종파괴 형상은 Fig. 12와 같이 연결부 근처 보 상부에 콘크리트의 분쇄파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다. 연결부에 나타난 콘크리트의 분쇄파괴는 PBC 1 시험체의 보-기둥 연결부가 철근으로만 연결되어, 층간변위비의 증가에 따른 불연속 지점에 응력이 집중하여 철근의 부착파괴를 시작으로 국부파괴가 일어나는 것으로 판단된다. 이러한 국부파괴 형상은 시험체의 연성도와 강도를 저하시키는 원인이 된다. 또한 보 상부의 기존 콘크리트와 토핑 콘크리트 사이의 계면에 나타난 균열은 토핑 콘크리트의 양생 시 발생 가능한 온도변화와 건조수축 등의 불균등한 체적변화로 인한 계면에 추가적으로 발생하는 응력과 계면이 반복하중 재하 시 두 층이 합성거동을 할 수 있도록 충분한 부착강도를 확보하지 못하여 나타나는 것으로 판단된다[7]. 따라서 이러한 연결방법을 건설현장에 적용 시에는 이에 대한 정밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 한편 Fig. 18에서 PBC 1 시험체의 연결부 띠철근 변형률을 보면, 보의 연결부에 철제블록(transfer block)을 사용한 PBC 2~4 시험체들에서 나타난 코어 콘크리트(core concrete) 구역의 응력집중과 다르게 층간변위비에 따라 연결부 전체에 고른 응력분포를 나타냈었다. 이러한 연결부 띠철근의 거동은 Figs. 12~15에서와 같이 PBC 1 시험체와 PBC 2~4 시험체의 파괴형상이 다르게 나타나는 원인으로 판단된다.

PBC 2 시험체는 기둥의 복부경사균열이 층간변위비 1.0%에서부터 발생하였고, 층간변위비의 증가에 따라 계속 발달하였다. 층간변위비 3.5%에서는 하부 철제블록(transfer block)과 보의 주철근이 연결된 부위에 균열이 진전되어 콘크리트의 박락이 시작되었으며, 이로 인해 보의 주철근이 노출되기 시작하였다. 이 하중 하에서 철제블록(transfer block)과 기둥사이에 지지된 지압판(와셔)의 연결부분에 뽑힘파괴가 일어났다. 이 때 볼트와 철제블록(transfer block) 사이에는 이미 2 mm이상의 유격을 보였다. 최대하중은 층간변위비 5.0% (736 kN)에서 발생하였고, 최종파괴형상은 Fig. 13과 같이 연결부에 콘크리트의

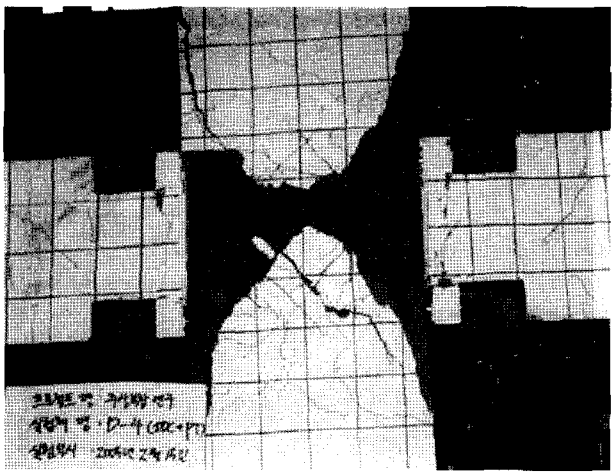

**Fig. 14** Failure of PBC 3

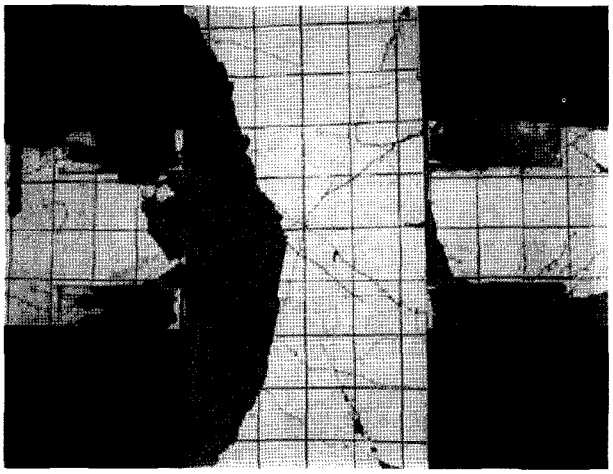

**Fig. 15** Failure of PBC 4

박락이 일어났으며, 보와 기둥사이에 유격이 발생하였다. 보와 기둥사이에 발생한 유격은 층간변위비의 증가에 따라 덕타일 로드(ductile rod)에 연결된 볼트가 자체적 회전으로 발생한 변위이며, 이러한 변위는 연결부의 연성거동을 유발시키는 것으로 판단된다. 이러한 거동을 통하여, DDC 시스템은 시공의 편리성이나 강도, 변형능력 등의 역학적 특성이 기존의 프리캐스트 콘크리트 연결부인 PBC 1 시험체에 사용된 공법보다 우수한 공법으로 생각된다. 그러나 구조물의 안전성 측면에서 강-기둥, 약-보의 개념으로 볼 때 보에 에너지를 분산시키지 않고, 연결부에서 에너지를 소산시키게 되어, 최종에는 Fig. 13과 같이 파괴됨으로 인해 파괴 메커니즘이 취약한 것으로 나타났다. 또한 이러한 연결부에서의 에너지 소산은 Fig. 19에서 PBC 2 시험체의 연결부 띠철근 변형률을 통하여, 코어 콘크리트(core concrete) 구역의 응력집중 현상이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

PBC 3 시험체는 층간변위비 1.0%부터 보의 하부 철제 블록(transfer block) 위에 초기균열이 발생하였다. 기둥의 복부경사균열이 1.5%에서부터 발생하기 시작하여, 2.5%에서는 균열 폭이 1 mm 이상으로 커졌다. 최대하중은 층간변위비 3.5%(838 kN)에서 나타났으며, 최종파괴형상은 Fig. 14와 같이 연결부에 콘크리트의 박락이 발생하였다. 한편 PBC 3 시험체가 PBC 2 시험체 보다 최대하중은 크게 나왔지만, 최대하중 이후 연성능력은 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 덕타일 로드(ductile rod)와 포스트텐션의 도입으로 인하여 연결부 연결철근의 강성이 증가되지만 보에 에너지를 분산시키지 않고, 연결부에서 에너지를 소산시키게 되어, 최종에는 Fig. 14와 같이 파괴됨으로 인해 PBC 2 시험체와 같이 파괴 메커니즘이 취약한 것으로 판단된다. 또한 PBC 3 시험체에서는 PBC 2 시험체에서 나타난 덕타일 로드(ductile rod)와 볼트의 회전에 의한 연성거동이 발생하기 전에 연결부 콘크리트에서 응력집중이 발생하여, Fig. 10에서와 같이 최대하중 이후에 연성능력이 저하되는 것으로 나타났다.

PBC 4 시험체는 층간변위비 0.75%부터 보의 상부에 철근의 부착균열이 발생하였으며, 1.5%에서부터 보의 휨 균열과 기둥복부에 경사균열이 발생하기 시작하였다. 최대하중은 층간변위비 3.0%(679 kN)에서 발생하였고, 최종파괴형상은 Fig. 15와 같이 나타났다. PBC 4 시험체는 PBC 2 시험체에서의 덕타일 로드(ductile rod) 대신에 고강도 강봉(thread bar)을 철제블록(transfer block)에 연결시키게 되어, 연결부 내부의 덕타일 로드(ductile rod)와 같은 지판이 없으므로 연결부에서 에너지 흡수가 PBC 2에 비하여 떨어지게 된다. 이러한 특성으로 인하여 연결부의 강도는 PBC 2 시험체보다 적게 나타났으나 Fig. 11의 하중-층간변위비곡선에서 보는 바와 같이 최대하중 이후 연성거동을 하는 것으로 나타났다.

각 시험체의 예상내력과 실험 결과의 비교는 Table 5와 같으며, 예상내력과 실험 결과를 비교한 결과 PBC 1 시험체가 17%의 강도증가를 보였다. PBC 2 시험체는 46%의 강도증가를 나타내어 가장 효과적인 연결부의 내력을 보인 반면에 포스트텐션을 도입한 PBC 3, PBC 4 시험체는 예상내력보다 실험 결과를 통한 강도증가가 포스트텐션을 도입하지 않은 시험체에 비하여 낮은 단점을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부에 포스트텐션을 도입하게 되면 자가조정(self-centering) 등을 통하여 연결부의 안전성과 횡 강성의 증가는 기대할 수 있지만 연결부의 강도 증가에는 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 한편 본 연구에서의 예상내력과 실험결과의 비교는 각 시험체의 연결부 예상내력을 시험체 제

**Table 5** Theoretical and experimental strength beam-column connections

| Specimen | Moment (kN·m) | Shear (kN) | | |
|---|---|---|---|---|
| | Expected strength | Expected strength | Experimental strength | Experimental /Expected |
| PBC 1 | 458.8 | 404.6 | 474.2 | 1.17 |
| PBC 2 | 572.6 | 505.0 | 735.9 | 1.46 |
| PBC 3 | 988.5 | 645.7 | 836.9 | 1.30 |
| PBC 4 | 1,006.8 | 657.7 | 679.1 | 1.03 |

작여건상 동일한 강성으로 제작하지 못하여, 본 연구에서의 시험체와 다른 경우 그에 따른 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 연성능력 및 횡 강성 비교

각 시험체의 하중-층간변위비 곡선에 근거한 포락곡선(envelop curve)을 비교한 결과는 Fig. 16과 같다. 시험체별 연성도는 Fig. 16에서와 같이 철제블록(transfer block)을 적용한 시험체(PBC 2, PBC 3, PBC 4)는 연성도가 높은 것으로 나타났다. 즉, 힘의 집중이 기둥내부와 기둥 밖의 철제블록(transfer block)으로 분산되므로, 보-기둥 연결부의 연성도를 향상시켜주는 것으로 판단된다. 또한 DDC 시스템(PBC 2)의 프리캐스트 콘크리트 연결공법이 현재 국내에서 적용되고 있는 프리캐스트 콘크리트 공법(PBC 1)보다 성능의 우수성이 입증되었다. 각 시험체의 최대하중에 대한 연성도를 비교한 결과 최대하중 시 나타난 층간변위비는 DDC 시스템을 적용한 PBC 2(5.0%), PBC 3(3.5%) 시험체가 크게 나타났다. 이러한 현상은 DDC방식이 내부지판과 철제블록(transfer block)으로 에너지를 분산하기 때문에, 이 분산된 에너지가 철근의 과도한 응력집중으로 연결되지 않기 때문이다. 또한, PBC 1, PBC 4 시험체는 각각 2.5%, 3.0%의 층간변위비에서 최대하중이 나타났다. PBC 4 시험체는 최대하중에 대한 층간변위비는 3.0%로 나왔으나, 최대하중 이후 응력연화현상이 적으면서 8.5%까지 연성거동을 하는 것으로 나타났다. 이러한 거동을 통하여 덕타일 로드(ductile rod)를 적용하지 않더라도, 철제블록(transfer block)과 포스트텐션의 도입으로도 보-기둥 연결부의 연성거동을 유도할 수 있을 것으로 예상되며, 정확한 예측을 위해서는 이와 관련된 많은 변수에 대한 실험 연구가 필요할 것으로 판단된다.

각 시험체의 횡 강성 비교는 Fig. 16을 통하여 비교하였다. 시험체 별 횡 강성은 PBC 1와 PBC 2 시험체가 유사한 횡 강성을 보였으며, 포스트텐션을 도입한 PBC 3, PBC 4 시험체는 Fig. 16에서 보는 바와 같이 포스트텐션을 도입하지 않은 시험체보다 횡 강성이 약 52~83% 크게 나타냈다. 이러한 결과를 통하여 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부의 횡 강성은 연결철물에 따라 큰 차이를 나타내지 않는 것을 볼 수 있었으며, 연결부에 포스트텐션의 도입은 횡 강성의 증가에 기여하는 것으로 판단된다.

### 3.3 에너지 소산량 비교

각 시험체의 횡 강성은 에너지 소산량을 계산한 결과, 동일한 층간변위 시 사이클(cycle)은 첫 번째 회전의 에너지 소산량이 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 그 이후의 사이클(cycle)에서의 에너지 소산량은 줄어드는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 시험체의 각 층간변위비별 첫 번째 사이클의 에너지 소산량을 기준으로 누적 에너지 소산량을 비교하였으며, 누적 에너지 소산량을 PBC 1을 기준으로 층간변위비 3.0%까지 비교한 결과는 Table 6와 같다. 그 이상의 층간변위비에 대해서는 PBC 1 시험체의 파괴로 인하여 비교하지 못하였으며, Fig. 17을 통하여 비교하였다.

### 3.4 연결부 띠철근의 변형률

보-기둥 시험체의 연결부에 콘크리트를 구속하고 있는 띠철근이 층간변위비에 따라 변형률에 미치는 영향을 분석하고자 연결부 띠철근의 변형률을 측정하였다. 측정된 연결부 띠철근의 위치는 보의 높이가 600 mm(±300 mm)이고, 기둥 내부의 상·하 연결철물의 간격은 460 mm이내 이므로 ±230 mm 이내에 위치한 띠철근은 연결부 코어 콘크리트(core concrete) 내부에 위치한 것으로 볼 수

**Table 6** Comparison ratio of accumulated energy dissipation

| Story drift ratio(%) | PBC 1 | PBC 2 | PBC 3 | PBC 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 1.00 | 1.36 | 1.43 | 1.13 |
| 2.0 | 1.00 | 1.18 | 1.79 | 1.39 |
| 3.0 | 1.00 | 0.91 | 1.52 | 1.16 |

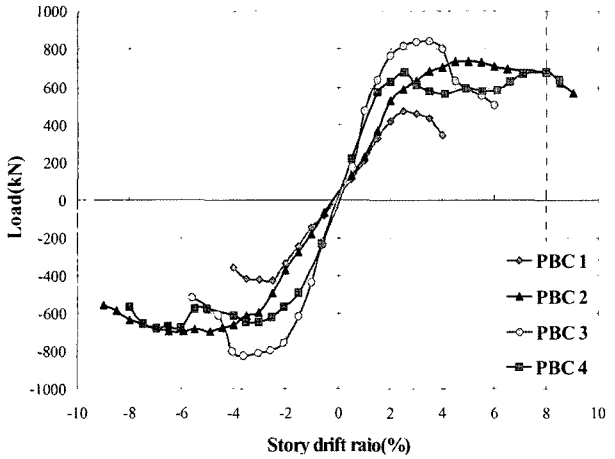


**Fig. 16** Comparison of envelop curves

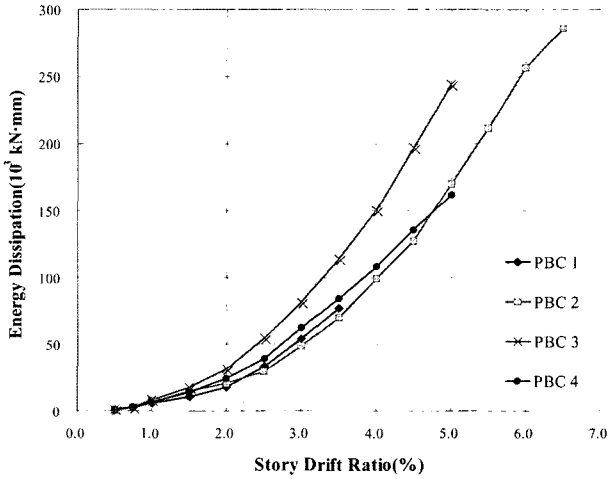


**Fig. 17** Comparison of accumulated energy dissipation

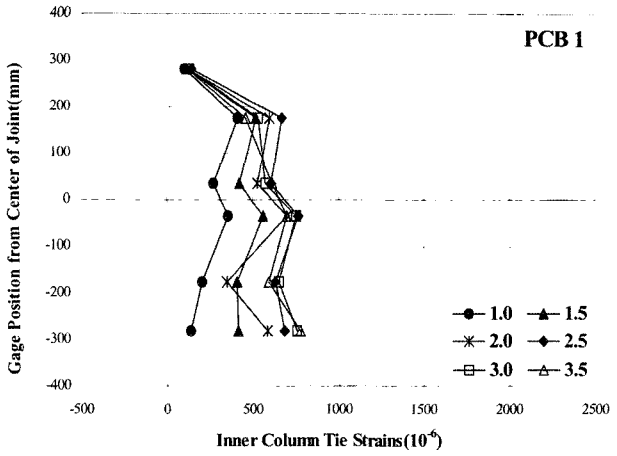


**Fig. 18** Strain of joint strip for PBC 1

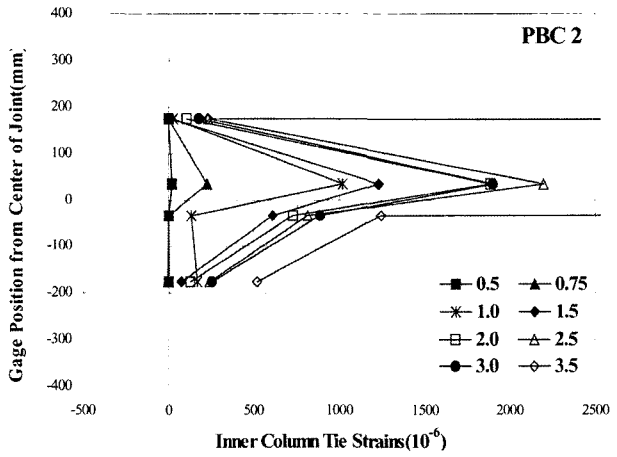


**Fig. 19** Strain of joint strip for PBC 2

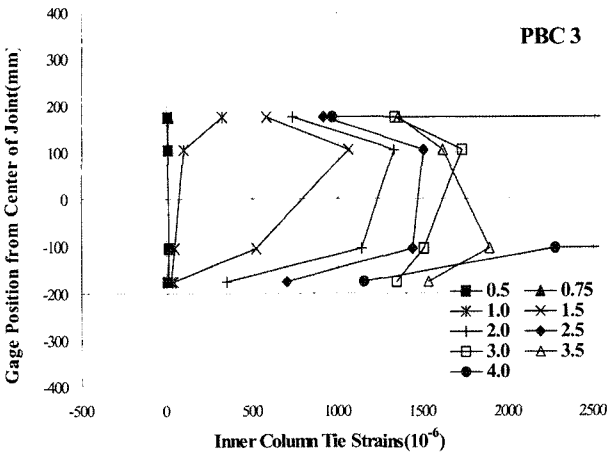


**Fig. 20** Strain of joint strip for PBC 3

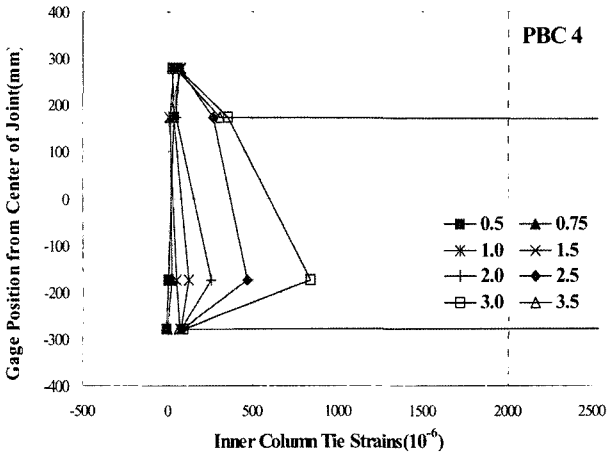


**Fig. 21** Strain of joint strip for PBC 4

있다. 실험 결과 Figs. 18~21에서와 같이 층간변위비가 증가할수록 띠철근의 변형률이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 철제블록(transfer block)을 사용한 연결부인 PBC 2~4 시험체들은 기둥의 연결부에 코어 콘크리트(core concrete)를 형성하고 있는 ±230 mm 이내에 위치한 띠철근이 층간변위에 따라 ±230 mm 밖에 위치한 띠철근보다 변형률이 크게 나타났으며, 이러한 결과를 통하여 보-기둥 연결부의 코어 콘크리트는 층간변위비의 증가에 따라 응력이 집중되는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 주상복합건물 또는 고층빌딩에 프리캐스트 콘크리트 건식 보-기둥 연결부의 적용가능성 여부를 실험을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 현재 국내에서 일반적으로 활용되고 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부인 PBC 1 시험체는 기둥의 스플라이스 접합부분에서 초기균열이 수평방향으로 발생하였다. 이 연결부 균열은 스플라이스 접합 시 사용되는 고강도 스플라이스 모르타르가 목표강도에 도달하지 못하여, 두 강체 사이에 일체화가 충분하지 못하였던 것으로 판단된다. 또한 보 상부의 기존 콘크리트와 토핑 콘크리트 사이의 계면에 나타난 균열은 토핑 콘크리트의 양생 시 발생 가능한 온도변화와 건조수축 등의 불균등한 체적변화로 인한 계면에 추가적으로 발생하는 응력과 계면이 반복하중 재하 시 두 층이 합성거동을 할 수 있도록 충분한 부착강도를 확보하지 못하여 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 국내에 활용되고 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부를 적용 시에는 습식공법을 적용하는 부분에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

2) DDC 시스템을 적용한 프리캐스트 콘크리트 건식 보-기둥 연결부는 본 연구에서 실험 결과 시공의 편리성이나 강도, 변형능력 등의 역학적 특성이 우수한 공법으로 판단된다. 그러나 구조물의 안전성 측면에서 강-기둥, 약-보의 개념으로 볼 때 보에 에너지를 분산시키지 않고, 연결부에서 에너지를 소산시키게 되어, 최종에는 연결부의 파괴가 나타남으로 인해 파괴 메커니즘이 취약한 것으로 나타났다.

3) 프리캐스트 콘크리트 건식 보-기둥 연결부에 포스트텐션의 도입은 연결부의 안전성을 나타내는 자가조정(self- centering) 등을 통하여 횡 강성의 증가에 기여하는 것으로 판단된다. 반면 프리캐스트 보-기둥 연결부에 포스트텐션의 도입은 연결부의 강도와 연성능력의 증가에는 기여하지 못하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌


1. Pillai, S. U. and Kirk, D.W., "Ductile Beam-Column Connection in Precast Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.78, No.6, 1981, pp.480~487.
2. Bhatt, P. and Kirk, D. W., "Test on an Improved Beam Column Connection for Precast Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.82, No.6, 1985, pp.834~843.
3. Nakaki, S. D., Stanton, J. F., and Sritharan, S., "An Overview of the PRESS Five-Story Precast Test Building", *PCI Journal*, Vol.43, No.2, 1999, pp.26~39.
4. 박홍근, 홍성걸, 이봉학, 유승룡, "프리캐스트 콘크리트 보-기둥 내진 연결부", 콘크리트학회지, Vol.16, No.5, 2004. pp.10~15.
5. Englekirk, R. E., "Development and Testing of a Ductile Connector for Assembling Precast Concrete Beams and Columns", *PCI Journal*, Vol.39, No.2, 1995, pp.36~51.
6. Englekirk, R. E., "Design-Construction of The Paramount-A 39-Story Precast Concrete Apartment Building", *PCI Journal*, Vol.46, No.4, 1995, pp.56~71.
7. 송형수, 이진용, 윤동용, 민창식, 최동욱, "앵커로 보수한 콘크리트 계면 거동의 고찰", 콘크리트학회 논문집, Vol.17, No.6, 2005. pp.885~892.



**요 약** 본 연구에서는 주상복합건물에 적용가능한 건식공법에 의한 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부에 대하여 실험을 통하여 분석하였다. 현재 국내에 활용하고 있는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결부와 현재 미국에서 사용되고 있는 DDC 연결부, 그리고 DDC 연결부와 개선된 연결부에 포스트텐션을 도입한 시험체를 제작하였고, 실험을 통하여 그 거동을 평가하였다. 실험 결과 보-기둥 연결부에 DDC 시스템을 적용하게 되면 연결부의 강도와 연성능력의 향상을 기대할 수 있었으나 파괴 메커니즘이 보에 에너지를 분산시키지 않고, 연결부에서 사인장 균열에 의하여 에너지를 소산시키게 되어 연결부가 파괴되는 단점이 나타났다. 개량 DDC 연결부는 기둥에 사인장균열이 발생하지 않고 보다 연성적인 파괴거동을 보여주었다. 또한 보-기둥 연결부에 포스트텐션의 도입은 연결부 강도의 증가는 크게 기대할 수 없었으나 자가조정(self-centering) 등을 통하여 연결부의 안정성 및 연성능력에 기여하는 것으로 나타났다.



**핵심용어** 프리캐스트 콘크리트, 보-기둥 연결부, DDC 연결부, 반복하중