



# 연성 강봉을 사용한 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능

이상진<sup>1)</sup> · 홍성걸<sup>2)</sup> · 임우영<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>삼성물산 건설부문 <sup>2)</sup>서울대학교 건축학과

## Seismic Performance of Precast Concrete Beam-Column Connections Using Ductile Rod

Sang-Jin Lee,<sup>1)</sup> Sung-Gul Hong,<sup>2)</sup> and Woo-Young Lim<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Samsung C&T Engineering & Construction Group, Seoul, 137-956, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

**ABSTRACT** Precast concrete (PC) beam-column connections using ductile rods are proposed for earthquake zone. An existing beam-column connection, two PC specimens designed by considering failure modes and a conventional RC specimen were tested under cyclic loading to evaluate the seismic performance. The specimens were designed to satisfy the requirements of current design code. The variables are the yield strength of longitudinal reinforcing bars of PC beams. The test results showed that the proposed system applying smaller yield strength of the longitudinal reinforcing bars at the PC beams than the ductile rods was satisfied with seismic criteria. The deformation capacity and energy dissipation capacity of the proposed PC beam-column connections were greater than those of the existing DDC system.

**Keywords :** precast concrete, beam-column connections, ductile rods, seismic performance, energy dissipation capacity

### 1. 서 론

프리캐스트 콘크리트(이하 PC) 공법 중 하나인 건식 공법은 용접 접합 또는 볼트 접합 등의 방법을 사용하여 PC 부재를 간단히 조립할 수 있으며, 공기 단축을 통해 건설 비용을 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다.<sup>1-9)</sup> Pillai 등과 Bhatt 등은 PC 기둥과 PC 보 상·하부에 강판을 설치한 뒤 용접을 하여 외부 PC 보-기둥 접합부의 강도와 연성을 확보하고자 하였다.<sup>1-2)</sup> 송형수 등은 DDC 접합부에 포스트 텐션 방식을 도입하여 기존 DDC 공법과 비교 분석하였다.<sup>5-6)</sup> 기존의 완전 건식 공법을 사용한 PC 보-기둥 접합부에 대한 연구는 보-기둥 연결 방식에 관한 연구가 주로 수행되어 왔다. 하지만 많은 사례에도 불구하고 완전 건식 공법으로 조립된 PC 보-기둥 접합부의 내진 성능에 대한 연구가 미진한 실정이다. ACI 318<sup>10)</sup> 또는 KCI 2007<sup>11)</sup>에 따르면, 내진 설계가 요구되는 지진 지역의 PC 보-기둥 접합부의 경우, 접합부의 내진성능 향상을 통하여 해당 구조설계 기준을 만족하여야 한다고 규정하고 있다.

대표적인 완전 건식 PC 보-기둥 접합부 방식 중 하나인 DDC 시스템은 기존의 설계 개념과 반대의 설계 개념을 사용하고 있다.<sup>5-7)</sup> Englekirk에 의해 실용화된 DDC (Dywidag ductile rod) 시스템 공법은 Dywidag사에서 개발되었다. DDC를 이용한 접합부는 PC 보와 연결된 강제 응력 전달 블록(transfer block)과 접합부에 설치된 연성 강봉(ductile rod)를 사용하여 PC 보와 PC 기둥을 간편하게 조립할 수 있다.<sup>5-7)</sup> DDC 시스템의 가장 큰 특징은 보의 주철근의 항복 강도보다 작은 항복강도를 지닌 연성 강봉을 접합부에 설치하여 연성 강봉의 항복을 유도하는 것이다. 기존의 DDC 시스템에서는 접합부의 파괴를 유도하기 위해 보의 주철근으로 항복 강도가  $f_y=800$  MPa인 고강도 강봉(thread bar)을 사용하였다. DDC 시스템은 시공성이 뛰어나고 접합부 내 연성 강봉의 항복을 유도하여 연성능력이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 많은 장점을 가진 DDC 시스템 공법은 실제 미국 파라마운트 빌딩에 적용된 사례가 있지만 내진 성능에 대한 검토는 보고된 적이 없다. 따라서 기존 DDC 시스템 공법에 대한 내진 성능의 검증이 필요하다.

Fig. 1은 기존 DDC 접합 방식과 접합부내 하중 흐름을 보여준다. PC 보에서 발생하는 압축력  $C$ 는 PC 보와 연결된 강제 응력 전달 블록으로 전달된다. 전달된 압축력은 연성 강봉으로 전해지며 PC 기둥의 압축 스트럿에 의

\*Corresponding author E-mail : wooyoung.lim97@gmail.com

Received March 24, 2014, Revised April 18, 2014,

Accepted August 26, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

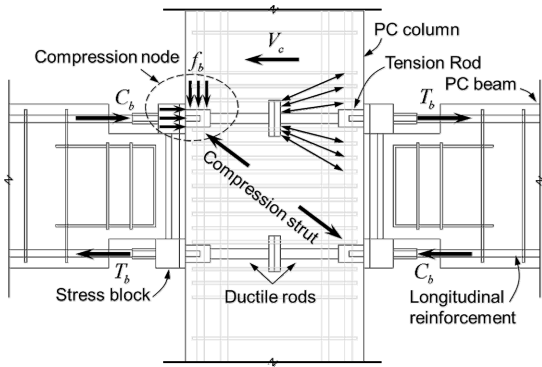


Fig. 1 Load flow within a DDC beam-column joint<sup>7)</sup>

해 대각선 방향으로 압축력이 발생한다. 이 때 압축절점 (compression node)에서는 압축응력과 지압응력  $f_b$ 가 발생한다. 보의 주철근에서 발생하는 인장력  $T$ 는 연성 강봉으로 전달되어 접합부의 연성 파괴를 유도한다. 접합부의 콘크리트에 균열이 발생한 후에는 접합부내 전단 철근에 의해 트러스 작용이 발생한다.

기존의 DDC 시스템에서는 보 주철근으로 고강도 강봉을 사용하기 때문에 접합부에서의 전단 요구량(shear demand)이 증가하여 접합부내 전단 철근이 과다 배근되는 경우가 발생하게 된다. 따라서 DDC를 이용한 PC 보-기둥 접합부의 보다 경제적이고 합리적인 설계를 위해 다양한 파괴 모드에 따른 접합부의 구조 성능과 내진 성능 등을

검토할 필요가 있다.

이 연구에서는 반복하중을 받는 PC 보-기둥 접합부의 파괴모드에 따른 내진 성능을 알아보려고 한다. 기존의 DDC 공법을 활용하여 보다 경제적이고 국내 실정에 부합하는 PC 보-기둥 접합부 설계 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 실험 프로그램

실험체는 일체형 기준 실험체(RCBC) 1개와 DDC를 이용한 실험체 3개(PCBC1, PCBC2, PCBC3) 등 총 4개의 실험체로 구성되어 있다. 모든 실험체는 ACI 318-08<sup>10)</sup>과 KBC 2007<sup>11)</sup>의 중간 모멘트 골조의 내진 설계 기준에 의해 설계되었다. Fig. 2와 Table 1은 실험체 상세와 실험 변수를 보여준다. 실험체의 변수는 PC 보 주철근의 종류와 항복강도( $f_y$ )이다. 보 단면의 크기는 250 mm × 700 mm이고 기둥 단면의 크기는 350 mm × 762 mm이다. 이 때 기둥의 크기는 응력 전달 블록(transfer block)의 크기를 고려해 결정되었다. 보의 주철근으로 D32 고강도 강봉과 동일한 크기의 이형 철근이 사용되었으며, 보와 기둥의 전단 철근은 모두 D10 이형 철근(SD400,  $f_y=400$  MPa)이 사용되었다. 일체형 기준 실험체(RCBC)와 PCBC2, 그리고 PCBC3 실험체의 보 주철근은 이형 철근이 사용되었으며, PCBC1 실험체의 보 주철근은 고강도 강봉(thread bar,  $f_y=800$  MPa)이 사용되었다.

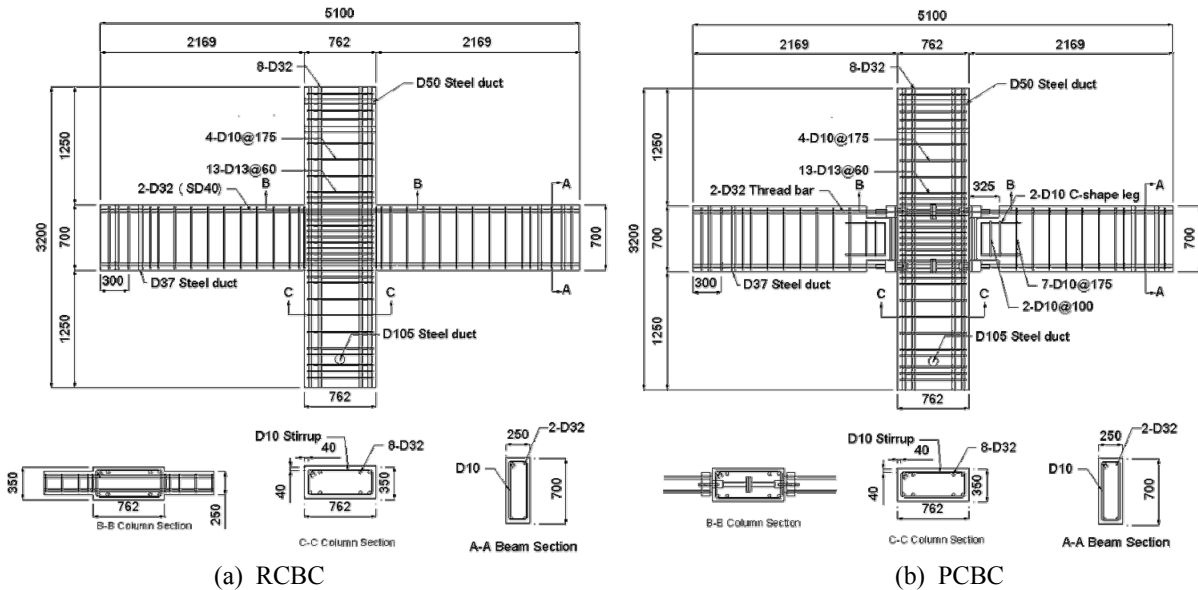


Fig. 2 Details of test specimens

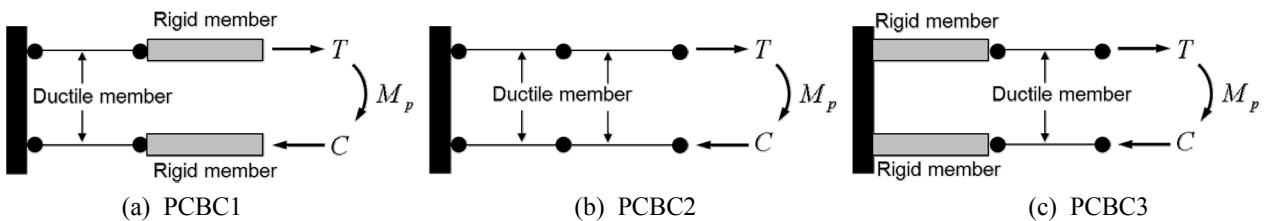


Fig. 3 Failure modes of PC specimens for design

**Table 1** Variables of test specimens

Specimens		RCBC	PCBC1	PCBC2	PCBC3		
Test parameters		Monolithic	Ductile rods Thread bars	Ductile rods Re-bars(SD400)	Ductile rods Re-bars(SD300)		
Beam	Dimensions $b_b \times h_b$ (mm×mm)	250×700	250×700	250×700	250×700		
	Concrete strength $f_{ck}$ (MPa)	38.5	35.2	35.5	36.5		
	Re-bars ( $\rho^1$ , %)	Top	2-D32 (0.96)	2-D32 (0.96)	2-D32 (0.96)	2-D32 (0.96)	
		Bottom	2-D32 (0.96)	2-D32 (0.96)	2-D32 (0.96)	2-D32 (0.96)	
	Type of reinforcement	SD400	Thread bar	SD400	SD300		
	Stirrup (type of reinforcement)	D10 (SD400)	D10 (SD400)	D10 (SD400)	D10 (SD400)		
Nominal moment capacity <sup>2)</sup> $M_{nb}$ (kNm)	382.0	755.8	380.7	289.9			
Column	Dimensions $b_c \times h_c$ (mm×mm)	350×762	350×762	350×762	350×762		
	Concrete strength $f_{ck}$ (MPa)	38.5	35.2	35.5	36.5		
	Re-bars ( $\rho$ , %)	8-D32 (2.51)	8-D32 (2.51)	8-D32 (2.51)	8-D32 (2.51)		
	Type of reinforcement	SD400	SD400	SD400	SD300		
	Tie (type of reinforcement)	D10 (SD400)	D10 (SD400)	D10 (SD400)	D10 (SD400)		
	Nominal moment capacity <sup>2)</sup> $M_{nc}$ (kNm)	739.8	739.8	739.8	739.8		
Ratio of column moment capacity $M_{nc}$ to beam moment capacity $M_{nb}$		1.94	0.98	1.94	2.55		
Beam-column Joint	Shear capacity <sup>3)</sup> $V_n$ (kN)	1418.4	1356.3	1362.0	1381.1		
	Shear demand <sup>4)</sup> $V_u$ (kN)	1209.1	2937.1	1257.4	891.9		
	Ratio of $V_n$ to $V_u$	1.17	0.46	1.08	1.55		
Maximum load-carrying capacity $P_n$ (kN)		Yielding	Max.	Yielding	Max.	Yielding	Max.
		315.1	452.8	274.9	409.0	274.9	409.0

<sup>1)</sup>  $\rho = A_s/bd$  ( $A_s = 2 \times 794.2 \text{ mm}^2$ ,  $A_s' = 2 \times 794.2 \text{ mm}^2$ ,  $b$  is width of PC beams,  $d$  is effective depth of the PC beams)  
<sup>2)</sup> Capacity of cross-section based on the results of material tests  
<sup>3)</sup> Joint shear capacity specified by ACI 318-0810) ( $1.2\sqrt{f_c'}A_j$ ;  $A_j = b_j h_c$ ;  $b_j$  is effective joint width,  $h_c$  is effective joint depth)  
<sup>4)</sup> Joint shear demand  $V_u = C_b + T_b - V_c$  ( $C_b = A_s \alpha f_y$ ;  $T_b = A_s' \alpha f_y$ ;  $\alpha = 1.25$ ;  $f_y$  is yield strength of longitudinal reinforcing bars(MPa))

Fig. 3은 실험체 설계를 위한 PC 실험체의 파괴 모드를 보여준다. PCBC1 실험체는 기존의 DDC 시스템을 사용하여 접합부내 연성 강봉의 변형 능력을 활용하는 방식이다. 패널존의 연성 강봉이 항복 후 충분한 연성기동을 보일 때까지 보의 주철근은 탄성 상태를 유지한다. 기존의 DDC 시스템은 연성 강봉의 항복을 유도하기 위해 보의 주철근으로 항복강도가 800 MPa인 고강도 강봉이 사용되었다. PCBC2는 연성 강봉뿐만 아니라 보의 주철근도 항복하도록 설계된 실험체이다. 보의 주철근으로 PCBC1이 고강도 강봉을 사용한 것에 반해, PCBC2에는 D32 (SD400,  $f_y=400 \text{ MPa}$ ) 이형 철근이 사용되었다. PCBC3 실험체는 접합부가 파괴되기 전 보의 주철근이 항복하도록 설계되었다. 보의 주철근의 항복을 유도하기 위해 연성 강봉의 설계 항복강도( $f_{dy}=400 \text{ MPa}$ )보다 약 25%정도 작은 항복 강도를 가진 D32 (SD300,  $f_y=300 \text{ MPa}$ ) 이형 철근이 보의 주철근으로 사용되었다. PC 보가 항복할 때까지 패널존의 연성 강봉은 탄성 상태를 유지한다. RCBC 실험체는

기존의 강-기둥 약-보 설계 개념을 사용으로 설계되었다. 실험체의 보의 모멘트 강도( $M_{nb}$ )에 대한 기둥의 모멘트 강도( $M_{nc}$ )의 비( $M_{nc}/M_{nb}$ )는 RCBC: 1.94, PCBC1: 0.98, PCBC2: 1.94, 그리고 PCBC3: 2.55로 RCBC, PCBC2, PCBC3는 기준( $M_{nc}/M_{nb} \geq 1.2$ )<sup>10,11)</sup>을 만족하였으나 기존 DDC 공법으로 제작된 PCBC1은 기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다.

ACI 318<sup>10)</sup>에 따르면 두 면이 구속된 접합부의 전단 강도  $V_n$ 은 다음 식(1)과 같이 정의된다.

$$V_n = 1.2\sqrt{f_{ck}}A_j \quad (1)$$

여기서,  $A_j$ 는 접합부에서 전단을 유발하는 철근의 면과 평행한 접합부 내의 유효 단면적( $\text{mm}^2$ )이다.

식(1)에서 구해진 접합부의 전단 강도  $V_n$ 은 식(2)에서 표현된 요구 전단력  $V_u$  이상이어야 한다.

$$V_u = C_b + T_b - V_c \quad (2)$$

여기서,  $C_b$ 와  $T_b$ 는 PC 보에서 발생하는 압축력과 인장력이며  $V_c$ 는 기둥에서 작용하는 전단력이다.

Fig. 4는 소성 모멘트(plastic moment,  $M_p$ )와 보-기둥 접합부의 하중 재하 능력  $P_n$ 을 보여준다. PC 보의 소성 힌지에서 발생하는 소성 모멘트가  $M_p = P_n H_c / 2$ 와 같으므로 PC 실험체의 예측된 하중 재하 능력  $P_n$ 은 다음 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$P_n = \frac{2M_p}{H_c} \quad (3)$$

여기서,  $H_c$ 는 기둥의 순 높이(mm)이다.

PCBC1 실험체의 경우, 접합부내 연성 강봉의 항복강도가 고강도 강봉의 항복강도에 비해 훨씬 작으므로( $f_{dy} = 400$  MPa,  $f_{thy} = 800$  MPa) 연성 강봉의 강도가 휨모멘트 강도를 결정한다. 따라서 접합부내 연성 강봉에 의해 발생하는 휨모멘트 강도( $M_y$ )는 연성 강봉의 항복강도( $f_{dy}$ )와 인장 강도( $f_{du}$ )를 이용하여 다음 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$M_{y(PCBC1)} = A_{sd} f_{dy} j d \quad (4)$$

여기서,  $A_{sd}$ 는 연성 강봉의 단면적( $A_{sd} = 1,554$  mm<sup>2</sup>),  $f_{dy}$ 는 연성 강봉의 항복강도(MPa),  $j d$ 는 보의 모멘트 팔길이(mm)이다.

PCBC2의 주철근은 접합부내 연성 강봉의 항복강도와 유사한 강도를 가진 D32 (SD400) 이형 철근이 사용되었다. 그러나 재료 실험에서 얻어진 D32 (SD400) 이형 철근의 항복강도가 연성 강봉의 항복강도보다 다소 크게 나타났으므로 연성 강봉의 항복강도가 PCBC2의 항복 모멘트 강도를 결정하게 된다. 따라서 PCBC2의 휨모멘트 강도는 PCBC1의 경우와 동일한 방법으로 다음 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$M_{y(PCBC2)} = M_{y(PCBC1)} \quad (5)$$

PCBC3와 RCBC 실험체의 휨모멘트 강도는 보 주철근의

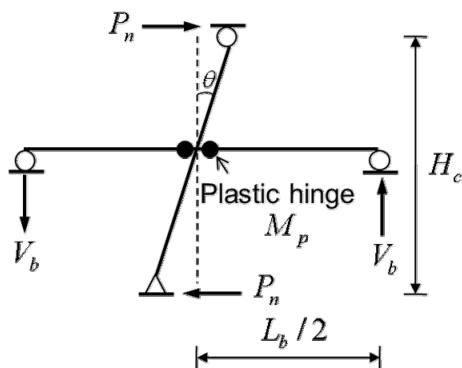


Fig. 4 Calculation of load-carrying capacity

항복강도를 사용하여 구할 수 있다. PCBC3와 RCBC의 주철근은 설계 항복강도가 각각  $f_y = 300$  MPa와  $f_y = 400$  MPa인 D32 이형 철근이 사용되었다.

$$M_y = A_s f_y j d \quad (6)$$

여기서,  $A_s$ 는 PC 보 인장 주철근의 총 단면적(mm<sup>2</sup>),  $f_y$ 는 PC 보 주철근의 항복강도(MPa)이다.

보-기둥 접합부의 요구 전단 강도( $V_u$ )에 대한 접합부 강도( $V_n$ )의 비( $V_n/V_u$ )는 RCBC: 1.17, PCBC1: 0.46, PCBC2: 1.08, 그리고 PCBC3: 1.55으로 PCBC1 실험체를 제외하고 나머지 실험체는 기준<sup>10,11)</sup>을 만족하였다. 기존의 DDC 시스템을 적용한 PCBC1 실험체는 설계 기준을 만족시키지 못하였다.

Fig. 5는 PC 실험체 조립 방법을 보여준다. RCBC 실험체는 일체형으로 제작하였으며, PC 실험체는 PC 보와 PC 기둥을 따로 제작한 뒤 조립하였다.

Fig. 5(a)와 같이 강제 응력 전달 블록과 주철근을 조립한 후 콘크리트를 타설한다. Figs. 5(b), (c)는 PC 기둥과 PC 보의 조립에 쓰이는 부품들을 보여준다. PC 보에 설치된 강제 응력 전달 블록과 주철근은 팔각형 너트에 의해 조립되었으며, PC 보와 PC 기둥은 볼트(A490)를 이용해 서로 조립되었다. PC 보와 PC 기둥은 Figs. 5(d), (e)와 같이 렌치를 이용하여 수작업으로 조립되었다. 수작업으로 조립한 후 토크렌치를 사용해 요구되는 토크만큼 정밀하게 조여주었다. 이 때 볼트 조임력은 볼트의 나사산의 크기를 고려해 결정되었다.

Fig. 6은 실험체 설치 상태를 보여준다. 기둥 하부는 핀 지지 되었으며, 보의 양단에는 좌우 횡변위가 가능하도록 롤러 지지되었다. 기둥의 유효 높이는 2600 mm이고 보의 순 스패ンは 4500 mm이다. 기둥에는 축력을 가하지 않았으며 기둥 상부의 2000 kN 액츄에이터를 사용해 반복 가력하였다.

보-기둥 접합부 패널존의 변형을 측정하기 위해 패널

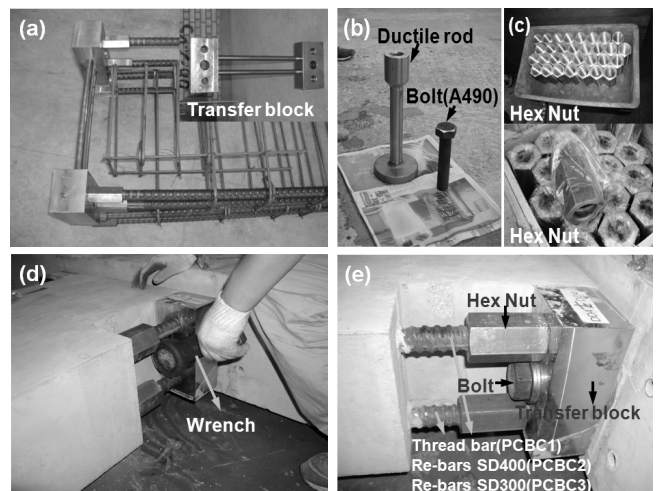


Fig. 5 Assembling of PC specimens

존에 다이얼 게이지(No. 9, No. 10)를 설치하였으며, PC 보와 접합부 사이의 계면에서 발생하는 변형을 측정하기 위해 계측기(LVDT, No. 1~No. 8)를 설치하였다.

실험체는 층간 변위비가  $\pm 0.1\%$  (2.6 mm),  $\pm 0.2\%$  (5.2 mm) 일 때에는 1회 사이클로 반복 가력하였으며 이후 실험체가 최종 파괴될 때까지 3회 사이클로 층간 변위비  $\pm 0.3\%$  (7.8 mm),  $\pm 0.5\%$  (13.0 mm),  $\pm 0.75\%$  (19.5 mm),  $\pm 1.00\%$  (26.0 mm),  $\pm 1.50\%$  (39.0 mm),  $\pm 2.00\%$  (52.0 mm),  $\pm 2.50\%$  (65.0 mm),  $\pm 3.00\%$  (78.0 mm),  $\pm 3.50\%$  (91.0 mm),  $\pm 4.00\%$  (104.0 mm),  $\pm 4.50\%$  (117.0 mm)의 순서대로 변위제어 방식으로 반복 가력하였다.

콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )를 측정하기 위해 1,000 kN UTM을 이용하여 재료 실험을 실시하였다. 각 실험체별로 3개씩 공시체를 제작하였으며 평균값을 구하였다. RCBC 실험체의 공시체의 콘크리트 압축강도는 평균  $f_{ck(RC)}=38.5$  MPa, PCBC1

실험체는  $f_{ck(PC1)}=35.2$  MPa, PCBC2는  $f_{ck(PC2)}=35.5$  MPa, 그리고 PCBC3는  $f_{ck(PC3)}=36.5$  MPa로 측정되었다.

강재의 역학적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801의 금속재료 인장시험편 규정에 따라 강재 인장 시험편을 제작하여 소재 인장실험을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 7과 Table 2와 같으며 D32 (SD300, SD400)철근과 고강도 강봉은 재료실험에서 구한 값을, 강재 블록, 연성 강봉, 그리고 볼트(A490)는 Dywidag사에서 제공된 자료를 사용하였다. PC 보의 주철근으로 사용된 D32 (SD300, SD400)이형 철근과 고강도 강봉과 연성 강봉의 항복강도는 각각  $f_{y(SD300)}=349.7$  MPa,  $f_{y(SD400)}=443.1$  MPa,  $f_{y(Tn)}=823.0$  MPa,  $f_{y(D)}=400.0$  MPa이다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 하중-층간 변형률 관계

Fig. 8은 실험체별 하중-층간 변형률 관계를 보여준다. 층간 변형률은 횡변위를 기둥의 유효 높이(2,600 mm)로 나눈 값으로 정의되었다. 부재의 변형 능력을 나타내는  $\Delta_y$ 는 항복 변위를 나타내고,  $\Delta_{max}$ 는 최대 하중에 도달했을 때의 변위, 그리고  $\Delta_u$ 는 최대 하중의 75%에 해당하는 변위이다. 항복변위  $\Delta_y$ 는 보의 주철근 또는 연성 강봉의 변형률이 항복 변형률에 도달할 때의 변위로 정의되었으며, 최대 하중의 75% 수준까지 하중이 감소하기 전 실험체가 최종 파괴되었을 경우,  $\Delta_u$ 는 실험체가 최종 파괴될 때의 변위로 정의되었다.  $P_n$ 은 예측된 최대 하중 재하 능력이다.

RCBC 실험체는 층간 변형률 약 1.0%에서 항복하였으며 2.0%에서 최대 강도에 도달하였다. 최종 파괴는 층간 변형률 약 4.0%에서 발생하였다. 하지만 가력 초기 실험체 보 부분 지점 세팅 과정에서 오차가 발생하여 슬립이 발생하였다. PC 실험체(PCBC1, PCBC2, PCBC3)는 층간 변형률 1.3%이상에서 항복하였으며 약 4.0%에서 최대 강도에 도달하였다. 최종 파괴는 층간 변형률 4.5~5.0%에서 발생하였다. RCBC의 최대 강도에 도달할 때의 변위에 대한 항복 변위의 비( $\Delta_{max}/\Delta_y$ )가 약 2.33~2.50이었던 것에 반해, 연성 강봉을 사용한 PC 실험체의 경우, 연성도는 2.80~3.34로써 항복 후 변형 능력이 RC에 비해 우수한 것으로 나타났다.

하지만 PC 실험체에서는 과도한 핀칭 현상이 발생하였다. 토크렌치를 사용해 요구되는 토크만큼 볼트를 연결하였지만, 실험체 제작 과정과 조립 과정에서의 오차로 인해 볼트로 연결된 접합부에서 슬립(slip)이 발생하여 재하 과정(load)에서 충분한 강성을 발휘하지 못한 것으로 판단된다.

각 실험체의 예측된 최대 하중 재하 능력  $P_n$ 에 대한 최대 강도  $P_{max}$ 의 비( $P_{max}/P_n$ )는 RCBC: 1.03, PCBC1: 1.06, PCBC2: 1.08, PCBC3: 1.01이었다.

Table 3은 실험 결과를 보여준다. 모든 PC 실험체의 최

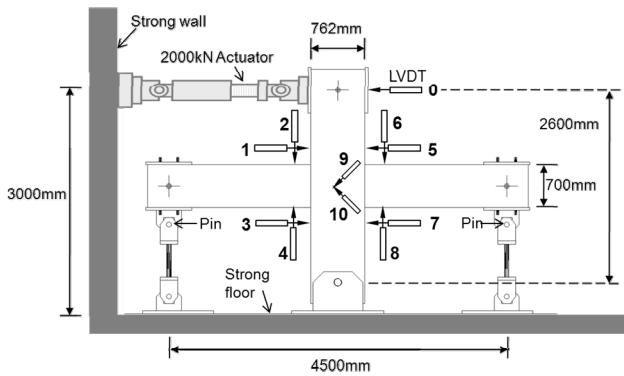


Fig. 6 Test setup

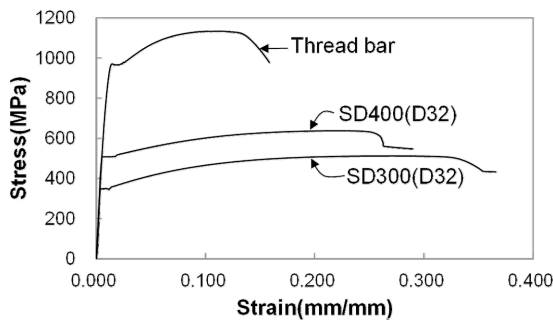


Fig. 7 Stress-strain relationship of re-bars

Table 2 Characteristics of re-bars

Specimens	Area (mm <sup>2</sup> )	Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Elongation (%)
SD300 (D32)	794.2	349.7	511.3	36.6
SD400 (D32)	794.2	443.1	636.8	29.0
Thread Bar	804	823.0	1133.3	15.9
Transfer Block	-	490.0	686.0	17.0
Ductile Rod	1554	400.0	595.0	15.0
Bolt (A490)	1139	877.0	1015.0	19.0

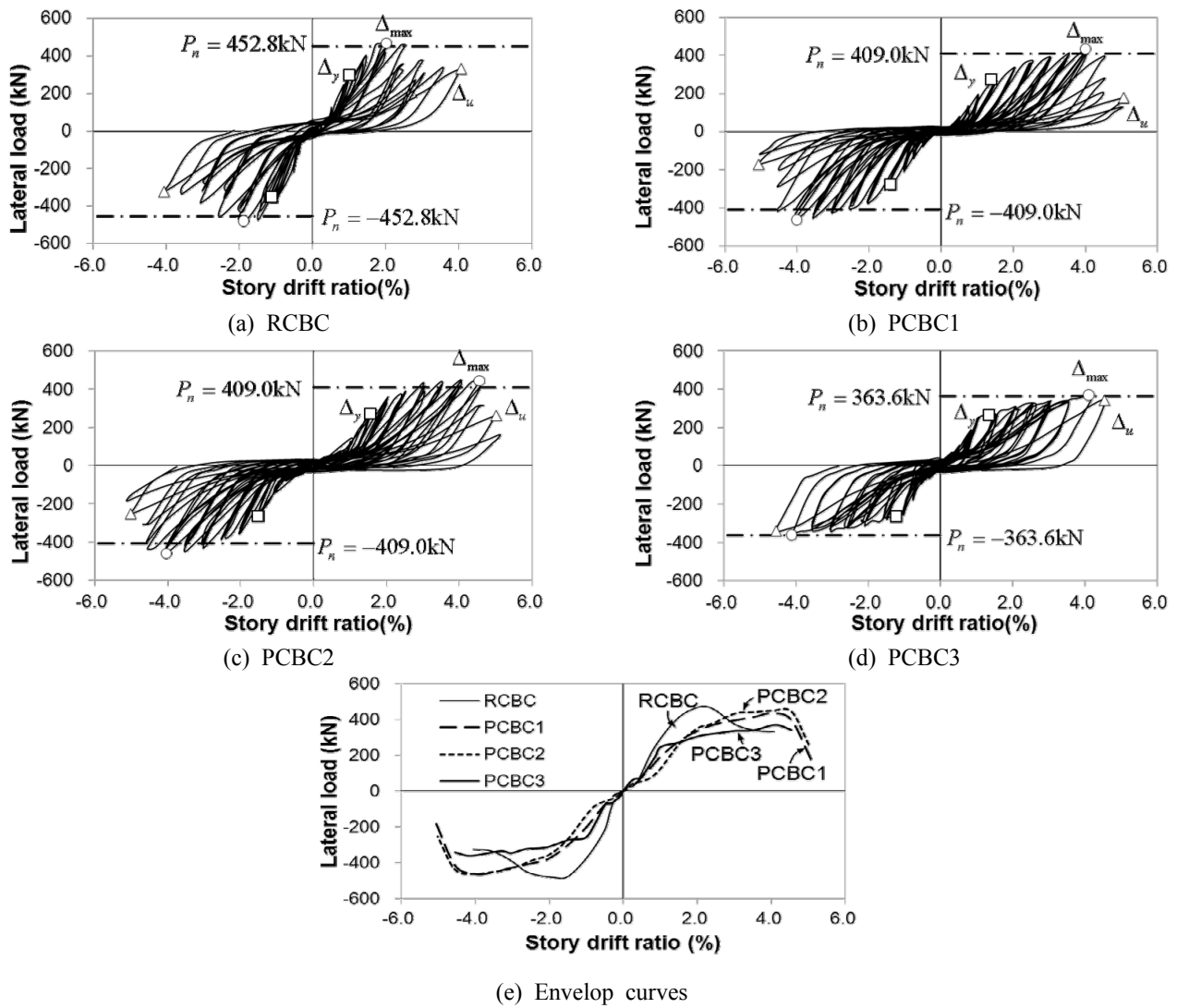


Fig. 8 Load-story drift ratio relationships of test specimens

Table 3 Summary of test results

Specimens	At maximum						At ultimate					
	Positive(+)			Negative(-)			Positive(+)			Negative(-)		
	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	story drift ratio (%)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	story drift ratio (%)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	story drift ratio (%)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	story drift ratio (%)
RCBC	467.0	52.6	2.02	-481.1	-48.8	-1.88	331.2	105.6	4.06	-324.4	-105.3	-4.05
PCBC1	433.7	104.3	4.01	-461.8	-104.3	-4.01	178.4	131.8	5.07	-172.4	-131.8	-5.07
PCBC2	442.5	118.3	4.55	-461.4	-104.9	-4.03	260.7	130.2	5.01	-253.3	-130.2	-5.01
PCBC3	368.6	106.9	4.11	-360.7	-106.9	-4.11	340.0	118.1	4.54	-340.9	-118.1	-4.54

Specimens	At yielding								$P_{max}/P_y$		$\delta_{max}/\delta_y$	
	Positive(+)				Negative(-)							
	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	story drift ratio (%)	$k_y$ (kN/mm)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	story drift ratio (%)	$k_y$ (kN/mm)	(+)	(-)	(+)	(-)
RCBC	294.7	26.1	1.00	11.29	-357.9	-28.6	-1.10	12.51	1.58	1.34	2.02	1.71
PCBC1	271.3	35.9	1.38	7.56	-279.2	-36.9	-1.42	7.57	1.60	1.65	2.91	2.83
PCBC2	272.0	40.3	1.55	6.75	-264.6	-39.3	-1.51	6.73	1.63	1.74	2.94	2.67
PCBC3	264.2	34.8	1.34	7.59	-264.0	-32.0	-1.23	8.25	1.40	1.37	3.07	3.34

대 강도와 초기 강성( $k_y$ )은 RCBC 실험체에 비해 낮게 나타났다. 초기 강성은 항복 변위에 대한 항복강도의 비( $P_y/\Delta_y$ )로 정의되었다. PCBC3의 최대 강도가 RCBC에 비해 약 20%정도 작은 값을 나타낸 이유는 PCBC3에 사용된 PC 보 주철근의 항복강도가 RCBC의 항복강도에 비해 작기 때문이다. 재료 실험으로 얻어진 SD300 이형철근의 항복강도와 SD400의 항복강도 비는 약 0.79였다(Table 2 참조).

RCBC의 초기 강성에 대한 PC 실험체의 초기 강성 비는 RCBC1: 0.67, PCBC2: 0.60, PCBC3: 0.67로써 PC 실험체의 초기 강성이 일체형 실험체에 비해 평균 35%정도 작은 값을 보여주었다.

### 3.2 파괴 모드와 손상 정도

Fig. 9는 실험 종료시 실험체의 파괴 모드와 손상 정도를 보여준다. RCBC는 층간 변형률 4.0%, PCBC1은 6.0%, PCBC2는 5.0%, PCBC3는 4.5%에서 실험이 종료되었다.

RCBC 실험체의 경우 Fig. 9(a)에서 보이는 바와 같이 패널존에서 대각 균열이 발생하였으며, 최대 하중 도달 이

후 보에 소성 힌지가 발생하였다. PCBC1 실험체는 Fig. 9(b)에서 보이는 바와 같이 패널존에서 심각한 전단 파괴가 발생하였다. RCBC와는 달리 패널존의 대각 균열은 PC 보의 높이로부터 약 400 mm 높이까지 진전되었다. PC 보에서는 소성힌지가 발생하지 않았으며 심각한 균열도 관찰되지 않았다. 하지만 패널존에서는 콘크리트 압괴와 박리가 모두 발생하였다. 기존의 DDC 시스템을 사용한 PCBC1은 항복 후 최대 하중에 도달하기까지 충분한 연성 능력을 보여주었으나(Fig. 8(b) 참조) 패널존의 심각한 파괴로 인해 최대 하중 도달 이후 급격하게 하중이 감소하였다. PCBC2 실험체는 PCBC1과 유사한 파괴모드를 보여주었다(Fig. 9(c) 참조). 연성 강봉의 항복강도와 유사한 항복강도를 가진 이형 철근을 PC 보에 사용하더라도 결국 연성 강봉의 조기 항복으로 인해 패널존의 파괴가 심각하게 발생하였다. PCBC1과 PCBC2의 경우, 패널존의 전단 균열 발생 이후 연성 강봉의 슬립 거동으로 인해 균열 폭이 증가하였고 이 후 패널존 콘크리트의 박리가 발생하였다. PCBC3 실험체의 경우, 다른 PC 실험체와는 달리 PC 보에서 소성힌지가 발생하였다. 연성 강봉이 사

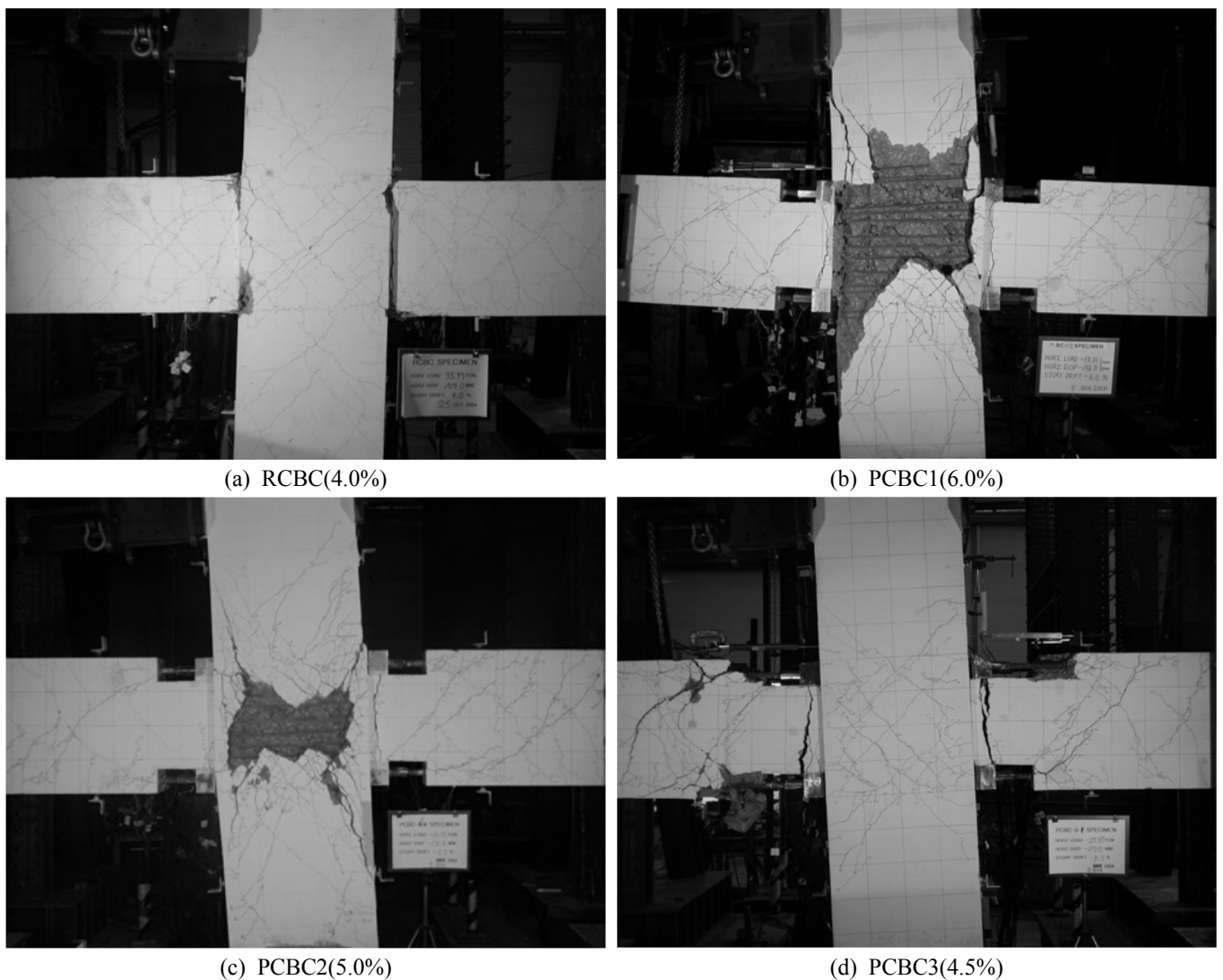


Fig. 9 Failure mechanisms and damage patterns of test specimens at the end of the test

용되었음에도 불구하고 패널존의 심각한 파괴는 발생하지 않았다. 하지만 층간 변형률 3.0% 이후 PC 보 주철근의 좌굴과 함께 PC 보의 콘크리트 피복이 들뜨는 현상이 관찰되었다. 최대 강도 도달 이후 PC 보의 응력 블록 하부에서 콘크리트의 인장파괴가 발생하여 실험이 종료되었다. 비록 주철근의 좌굴과 응력 블록과 PC 보의 사이에서의 콘크리트 인장파괴로 인해 최대 강도 도달 이후 하중의 감소가 뚜렷이 나타나진 않았지만, 주철근의 항복 후 PCBC3 실험체는 우수한 연성능력을 보여주었다.

### 3.3 철근 변형률

Fig. 10~12는 각각 PC 보의 주철근, PC 기둥의 전단철근, 그리고 패널존내 연성 강봉의 변형률 변화를 보여준다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이 RCBC, PCBC2, 그리고 PCBC3의 주철근은 각각 층간 변형률 -1.41%, -3.33% 그리고 3.56%에서 항복하였다. 하지만 기존의 DDC 시스템을 적용한 PCBC1의 주철근은 실험 종료 시까지 탄성상태를 유지하였다. 이 때 RCBC 주철근의 변형률은 PC 실험체와 비교하기 위해 접합부 계면에서 동일한 거리에 위치한 스트레인 게이지(strain gauge)에 의해 측정되었다.

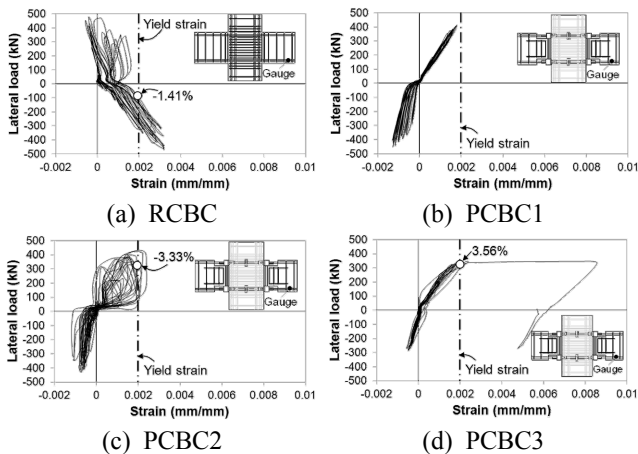


Fig. 10 Strain variation of the flexural reinforcement

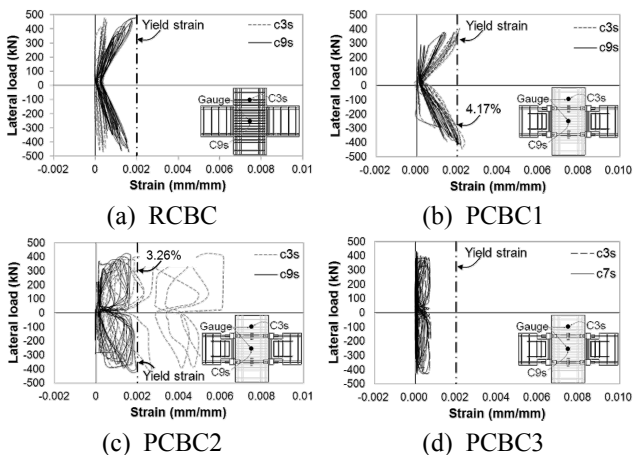


Fig. 11 Strain variation of the shear reinforcement

Fig. 11은 패널존 전단 철근의 변형률 변화를 보여준다. PCBC1과 PCBC2 실험체의 접합부 전단철근은 각각 층간 변형률 4.17%과 3.26%에서 항복하였으나, RCBC와 PCBC2의 전단철근은 실험 종료 시까지 항복하지 않았다.

Fig. 12는 PC 실험체의 연성 강봉의 변형률 변화를 보여준다. PCBC2의 연성 강봉은 층간 변형률 -2.34%에서 항복하였으나, PCBC1와 PCBC3의 연성 강봉의 변형률은 항복 변형률에 도달하지 않았다. 특히 PCBC1의 경우 연성 강봉의 변형률이 항복변형률에 도달하지 못한 이유는 Fig. 9(b)에서 보이는 바와 같이 패널존의 과도한 파괴로 인해 연성 강봉이 항복되기 전 실험체가 최종 파괴되었기 때문이다. 비록 PCBC1의 연성 강봉이 항복하지 않았지만 주철근과 전단철근 그리고 연성 강봉의 항복 변형률의 변화를 분석한 결과, 예상 파괴모드와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

### 3.4 패널존의 평균 전단 변형

Fig. 13은 패널존의 평균 전단 변형을 보여준다. 평균 전단 변형은 패널존에 설치된 두 개의 LVDT (No. 9, No. 10)에 의해 측정된 변형값을 사용하여 다음 식 (7)과 같

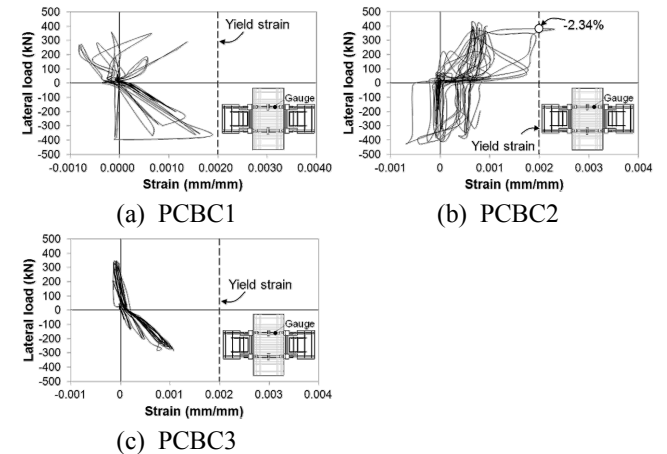


Fig. 12 Strain variation of the ductile rod

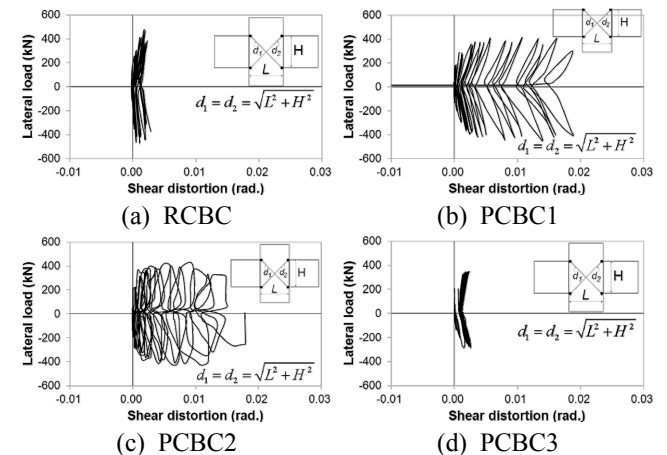


Fig. 13 Shear distortion of the panel zone



이 구하였다.

$$\gamma_{avg} = \frac{d_1\delta_1 - d_2\delta_2}{2HL} \quad (7)$$

여기서,  $d_1$ 과  $d_2$ 는 패널존의 대각선 길이,  $H$ 와  $L$ 은 패널존의 높이와 길이이다.  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 는 LVDT에 의해 측정된 대각 방향 변형값이다.

RCBC와 PCBC3 실험체는 패널존의 변형이 거의 발생하지 않았으며 PCBC1과 PCBC2 실험체는 패널존의 변형은 다른 실험체에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 패널존의 변형으로 인해 Fig. 11(b)에서 보이는 바와 같이 PCBC1과 PCBC2 실험체의 패널존의 전단 철근이 항복하였다. PCBC1과 PCBC2 실험체는 Figs. 8(b), (c)에서와 같이 층간 변형률 4.5%까지 우수한 변형 능력을 보였지만 이후 패널존의 파괴로 인해 하중의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 반면에 DDC 연결부를 사용하면서 패널존의 파괴이전에 보 인장철근의 항복을 유도한 PCBC3 실험체의 패널존 전단 변형은 RCBC 실험체와 유사하게 나타났다.

### 3.5 에너지 소산 능력

Fig. 14는 층간 변형률의 증가에 따른 각 실험체별 누적 에너지 소산량을 보여준다. 에너지 소산능력은 하중-변위 곡선에서 각 사이클의 시작점과 끝점을 연결하여 나타나는 폐곡선의 면적으로 정의되었다.

실험결과 PCBC3 실험체가 다른 실험체에 비하여 우수한 에너지 소산 능력 보여주었다. 반면에 RCBC, PCBC1, 그리고 PCBC2의 에너지 소산 능력은 비교적 유사하게 나타났다. 패널존의 연성 강봉의 항복강도와 유사한 항복강도를 가진 이형철근을 보 주근으로 사용한 PCBC2의 에너지 소산량이 기존의 DDC 시스템인 PCBC1보다 다소

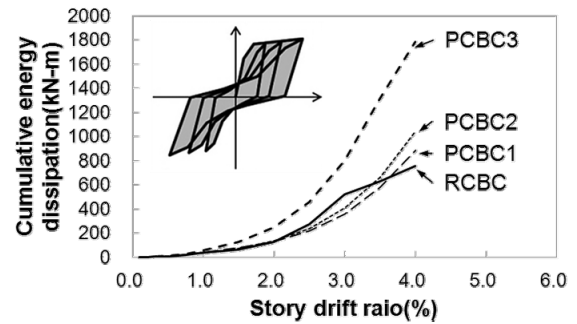


Fig. 14 Cumulative energy dissipation capacities

증가한 이유는 PC 보와 패널존에서 모두 소성 변형이 발생하였기 때문으로 판단된다. PCBC3 실험체의 경우, 패널존의 파괴를 조기 파괴를 억제한 상태에서 연성 강봉이 층간 변형률 -2.56%에서 항복하였고, 3.56%에서 주철근이 항복한 이후 변형률이 급격히 증가하여 에너지 소산량이 크게 증가하였다(Fig. 9(d), Fig. 10(d) 참조). 층간 변형률 4.0%에서 PCBC3 실험체의 누적 에너지 소산 능력에 대한 RCBC, PCBC1, 그리고 PCBC2의 에너지 소산 능력에 대한 비는  $E_{d(PC3)}/E_{d(RC)}=2.36$ ,  $E_{d(PC3)}/E_{d(PC1)}=2.02$ , 그리고  $E_{d(PC3)}/E_{d(PC2)}=1.71$ 로서 패널존의 파괴를 임의로 유도한 PCBC1 실험체에 비해 약 2배 정도 우수한 에너지 소산 능력을 보여주었다.

## 4. 내진성능 평가

ACI 374<sup>12)</sup>에서는 지진 지역에서의 PC 적용을 위하여 모멘트 골조에 대한 허용 기준안을 채택하고 있다. ACI 318<sup>10)</sup>의 요구 조건을 만족하지 않는 철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 내진 성능을 실험적으로 평가할 경우 언급한 허용 기준안을 만족할 경우 강진지역에서의 프리캐스트 콘크리트 구조의 적용을 허용하고 있다. ACI 374<sup>12)</sup>에 따르면, 공칭 강도로 구한 하중  $P_n$ 은 허용 층간 변위를

Table 4 Evaluation of seismic performance for test specimens

Specimens		PCBC1		PCBC2		PCBC3	
		+dir.	-dir.	+dir.	-dir.	+dir.	-dir.
Maximum and lateral forces at 3.5% drift ratio (kN)	(1) $P_{max}$	433.7	-461.8	442.5	-461.4	368.6	-360.7
	(2) $0.75P_{max}$	325.3	-346.4	331.9	-346.1	276.5	-270.5
	(3) $P$ at 3.5%	397.1	-422.4	425.7	-421.1	329.1	-318.2
	(4) Ratio=(3)/(2)	1.22	1.22	1.28	1.22	1.19	1.18
Stiffness (kN/mm)	(5) Initial $K$	5.7	5.7	3.6	4.5	7.7	7.1
	(6) 5% of initial $K$	0.284	0.283	0.181	0.224	0.385	0.356
	(7) $K$ at -0.35%~0.35%	0.155	0.252	0.125	0.316	0.561	0.619
	(8) Ratio=(7)/(6)	0.54	0.89	0.69	1.42	1.46	1.74
Energy dissipation (kN·mm)	(9) Elastic plastic energy dissipation, $E_{ep}$ at 3.5%	155,303		149,969		119,103	
	(10) Actual energy dissipation, $E_D$ at 3.5%	5,774		6,872		19,557	
	(11) Ratio=(10)/(9)	0.037		0.046		0.164	

초과하기 전에 발휘되어야 하며 최대 하중  $P_{max}$ 는  $\lambda P_n$ 이 하여야 한다. 여기서,  $\lambda$ 는 보 모멘트 합에 대한 기둥 모멘트 합의 비이다. 아울러 이력 곡선의 세 번째 사이클 곡선에서 층간 변형률 3.5%일 때 최대 하중의 75%보다 커야한다. 그리고 층간 변형률 3.5%의 세 번째 사이클 곡선에서 층간 변형률 -0.35~0.35% 사이의 활선강성(secant stiffness)은 초기 강성의 5%보다 커야 한다. 마지막으로 층간 변형률 3.5%일 때 마지막 사이클의 에너지 소산 비율( $\beta$ )은 0.125 이상이어야 한다.

Table 4는 각 실험체별로 ACI 374<sup>12)</sup>에 따른 내진 성능을 평가한 것이다. 평가 결과 모든 실험체는 층간 변형률 3.5%일 때의 하중을 최대 하중의 75%로 나눈 값이 1이상이므로 강도에 관한 평가 기준을 모두 만족한다. 하지만 초기 강성의 5%에 대한 층간 변형률 3.5%일 때의 세 번째 사이클의 -0.35%와 0.35% 사이에서의 활선 강성의 비가 PCBC3만 1이상으로 내진 평가 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 층간 변형률 3.5%일 때 마지막 사이클의 에너지 소산 비율이 PCBC1, PCBC2 실험체는 0.125 이하로 나타났고 PCBC3 실험체만 내진 평가 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

모든 PC 실험체에 대하여 내진 성능 평가를 한 결과 PCBC3 실험체만이 평가 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 이는 PCBC3 실험체의 경우, Fig. 10(d)와 같이 보 주철의 변형률이 항복 후 급격히 증가하였기 때문이다. 반면에, PCBC1과 PCBC2는 접합부의 과도한 파괴로 인해 보 주철근과 연성 강봉이 항복 후 충분한 변형이 이루어지지 않아 에너지 소산능력이 PCBC3 실험체에 비해 상대적으로 낮게 평가되어 기준을 만족시키지 못한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

기존의 DDC 공법은 시공의 편리성과 함께 우수한 변형 능력 등 다른 PC 보-기둥 접합부에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 기존의 DDC 공법이 지진 구역에 적용되기 위해서는 내진 성능 기준을 만족시켜야 하며, 아울러 구조 설계 기준을 만족하도록 설계되어야 한다. 이 연구에서는 기존의 DDC 공법을 적용한 보-기둥 접합부와 구조 설계 기준을 만족하도록 설계된 PC 보-기둥 접합부의 내진성능을 알아보았다. 이 연구에서의 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 DDC 보-기둥 접합부는 RCBC 실험체에 비해 우수한 연성능력을 보여주었으나 패널존의 과도한 파괴로 인해 최대 강도 도달 이후 급격한 하중 감소를 보여주었다. 반면에, 연성 강봉의 항복강도보다 작은 항복강도를 가진 이형철근을 사용한 PCBC3 실험체는 PC 보에 소성힌지가 발생하여 다른 PC 실험체에 비해 보다 연성적인 거동을 보여주었다. 기존의 DDC 접합부와 같이 보 주철근의 항

복강도가 연성 강봉의 항복강도보다 클 경우 패널존의 전단 철근의 요구량은 증가하게 된다. 따라서 연성 강봉을 사용한 PC 보-기둥 접합부를 현행 기준에 따라 설계할 경우에는 패널존의 파괴를 유도하는 것은 지양해야할 것으로 판단된다.

- 2) 모든 실험체의 최대 강도는 예측된 강도와 매우 유사하게 나타났다. 보 주철근의 항복강도는 실험체의 강도와 파괴모드를 결정하는 주요 변수임을 확인할 수 있었다.
- 3) PCBC3 실험체의 경우, PC 보와 강제 응력 블록 사이의 연결부와 상·하부 주철근 주위 콘크리트 파괴로 인해 주철근이 좌굴되어 최종 파괴되었다. 따라서 제안된 PC 보-기둥 접합부의 효과적인 현장 적용을 위해서는 직경이 큰 주철근 주위에 충분한 콘크리트 피복두께를 확보하는 것이 필요하다.
- 4) PCBC3의 누적 에너지 소산 능력은 RCBC 실험체와 다른 PC 실험체(PCBC1, PCBC2)보다 우수한 것으로 나타났다. 특히, 패널존의 파괴를 유도한 PCBC1 실험체보다 약 2배 정도 큰 에너지 소산 능력을 보여주었다.
- 5) PC 실험체의 내진 성능을 평가한 결과 패널존의 변형을 최대한 억제하고 보 부재만이 에너지 소산에 참여시킨 PCBC3 실험체는 내진 평가 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 기존의 DDC 시스템을 사용한 PCBC1 실험체와 보 주철근으로 고강도 강봉 대신 유사한 항복강도를 가진 이형 철근을 사용한 PCBC2 실험체는 우수한 변형능력에도 불구하고 현행 내진 기준을 만족시키지 못한 것으로 나타났다.

기존의 DDC 시스템은 조립이 용이하고 공기를 단축시킬 수 있는 장점과 함께 변형능력이 우수하여 실제 현장 적용된 우수한 공법임에는 틀림이 없다. 하지만 이 시스템은 현행 구조설계기준과 내진 기준을 모두 만족하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 현행 기준을 만족시키도록 설계하기 위해서는 PC 보 주철근의 항복강도를 연성 강봉의 항복강도 작게 설계하는 것이 바람직하다. 그리고 볼트로 연결된 접합부에서 발생하는 펀칭 현상을 방지할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이다. 추후 PC 보와 PC 기둥 사이의 연결부 시공성에 대한 추가 연구가 요구되며 DDC 시스템에서 사용되는 강재의 사용량을 감축시키는 방안이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설 핵심 기술 연구 개발사업(03산학연 A07-06)과 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(13AUDP-B066083-01)에 의해 수행되었음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

## References

1. Pillai, S.U. and Kirk, D.W., "Ductile Beam-Column Connection in Precast Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 78, No. 6, November-December 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, November-December 1985, pp. 834-843.
3. Khaloo, A.R. and Parastesh, H., "Cyclic Loading of Ductile Precast Concrete Beam-Column Connection", *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 3, May-June 2003, pp. 291-296.
4. Khaloo, A.R. and Parastesh, H., "Cyclic Loading Response of Simple Moment-Resisting Precast Concrete Beam-Column Connection", *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 4, July-August 2003, pp. 440-445.
5. Song, H.S. and Yu, S.Y., "Analysis on the Behaviors of Precast Concrete Beam-Column Connections Subject to Cyclic Loading", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 4, August 2006, pp. 497-506.
6. Song, H.S. and Yu, S.Y., "Evaluation on the Behaviors of Precast Concrete Beam-Column Connections for Apartments", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 5, October 2006, pp. 657-666.
7. Englekirk, R.E., "Development and Testing of a Ductile Connector for Assembling Precast Concrete Beams and Columns", *PCI Journal*, Vol. 39, No. 2, March-April 1995, pp. 36-51.
8. 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.
9. Englekirk, R.E., "Seismic Design of Reinforced and Precast Concrete Buildings", *John Wiley and Sons*, 2003, pp. 296-345.
10. ACI 318-08, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI Committee 318, American Concrete Institute, 2008, pp. 203-367.
11. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoon dang Publishing Company, Seoul, Korea, 2008, pp. 406.
12. ACI Committee 374, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*, ACI 374.1-05, American Concrete Institute, 2005, pp. 1-9.

---

**요 약** 지진구역에 적용하기 위한 연성 강봉을 사용한 프리캐스트 콘크리트 (PC) 보-기둥 접합부를 제안한다. 기존의 DDC 시스템을 활용한 보-기둥 접합부, 파괴모드를 고려해 설계된 두 개의 PC 실험체, 그리고 일체형 RC 실험체가 내진성능을 위해 반복하중 하에서 실험하였다. 실험체는 현행 기준을 만족하도록 설계되었다. 변수는 PC 보 주철근의 항복강도이다. 실험결과 제안된 시스템은 내진기준을 만족하는 것으로 나타났다. 제안된 보-기둥 접합부의 변형능력과 에너지소산 능력은 기존의 DDC 시스템보다 우수한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 프리캐스트 콘크리트, 보-기둥 접합부, 연성 강봉, 내진 성능, 에너지 소산능력