관통형 연결재로 연결된 PC 보-기둥 맞댐 접합의 내진성능에 관한 실험적 연구

박순규^{1)*} · 김민희¹⁾

¹⁾울산대학교 건축대학

Seismic Performance of Precast Beam-Column Joints with Thru-Connectors

Soon-Kyu Park^{1)*} and Min-Hee Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Architecture, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

ABSTRACT This is a preliminary study on the development of precast beam-column joints for dry construction methodology. Precast beam column joints with thru-connectors (BCJ_TC) using high strength bars or PS strands were developed and their seismic performance including strength degradation, stiffness degradation and energy dissipation capacity was experimentally evaluated. Test results showed that compressive failures at the end blocks of PC beam members occurred dominantly while PC columns including panel zones were free from any damage. However, the connections confined with CFRP at the end block showed much improved seismic performance than that of the unconfined connections. Connections with neoprene pad fillers between beam and column interfaces were better than the other connections in all the seismic performances except initial stiffness. To improve the seismic performances of BCJ_TC, compressive strength of the concrete at the end block need to be increased to compensate for the additional compressive stresses due to unbonded connectors and deformation of connectors should be controlled respectively.

Keywords : PC system, beam-column joint, thru-connectors, unbonded, post-tension

1. 서 론

세계적으로 건축물의 초고층화, 초대형화가 일반화되고 있다. 초고층 건축물에 철근콘크리트 구조가 활발하게 이용되고 있으나 기존의 습식공법은 기후 조건과 공법상의 제약이 있어 건식공법인 PC(precast concrete) 구조시스템의 적용이 주목을 받고 있다. 그러나 국내의 PC 구조시스템에서는 습식공법이나 내민보 및 코벨을 사용하여 보-기둥 접합부를 해결하고 있다. 이러한 접합 방식은 제작, 운반, 설치 등에 있어서 비효율적인 면이 지적되고 있다. 국내외에서는 오래전부터 이러한 시공 성능을 개선하기 위해 맞댐 형식의 보-기둥 접합부를 개발하여 역학적 성능을 증명하기 위한 연구가 이루어져 왔다.¹⁻⁶⁾ 기존 연구에서는 PC 보와 PC 기둥이 연결되는 접합부에서 역학적 성능을 향상시키기 위해 보 단부의 휨 보강 철근의 일부를 강봉이나 강선으로 관통시키고 부분적으로 초기긴장력을 가하여 시스템의 일체성을 확보하고자 하였다. 이러한 연구 결과에 따르면 맞댐 형식의

보-기둥 접합부가 일체식 접합부에 비해 강도, 연성 및 에너지소산능력은 다소 부족한 것으로 알려지고 있다.²⁾

기존의 PC 기둥은 각 층에서 접합 부분이 보와 접합을 위하여 분절되고 후에 콘크리트로 충전되는 것이 일반적이다. 이 경우 PC 기둥은 연결부분에서 취약해지는 등 문제점이 있다. 특히 고층구조에서 PC 기둥을 사용할 경우 접합부에서 역학적 성능을 균일하게 유지한다는 것은 매우 중요하다. 연결부가 일체로 연속된 PC 기둥을 활용하기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 PC 보 단부를 PC 기둥에 맞대어 비부착 관통형 연결재로 연결함으로써 접합공정을 건식공법으로 개선하고자 하였다. 아울러 접합부의 역학적인 성능을 향상시키기 위하여 고강도 관통형 연결재를 초기에 긴장하여 연결하는 'PC 보-기둥 맞댐 접합(BCJ_TC: precast beam-column joints connected with thru-connectors)' 방식을 고안하였다.

BCJ_TC 접합부는 PC 보, PC 기둥, 관통형 연결재 등 다양한 부품들의 조합으로 구성되어 있어 외력에 저항하는 과정이 비교적 복잡하다. 보-기둥 맞댐 부분의 불연속성, 관통형 연결재에 작용하는 긴장력과 콘크리트와의 부착 문제 등 구조적 특성이 초기강성, 강성저하, 에너지소산능력 등 내진성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 실험크기의 접합부에 대하여 실험적 연구를 수행하였다.

*Corresponding author E-mail: pask@mail.ulsan.ac.kr
Received August 10, 2009, Revised February 21, 2010,
Accepted June 16, 2010
©2010 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 PC structural system

2. 실험 계획

2.1 실험체 계획

이 연구의 실험체는 20층 정도의 고층 주거 구조물의 저층부 “+”형 부분 구조체로서 실물 크기로 계획하였다 (Fig. 1 (b)). 실험체는 PC 보, PC 기둥, 연결재, 접합면 채움재로 구성된다. PC 보 접합 단부에는 연결재 체결을 위한 빈 공간이 있고 연결재 체결 후 콘크리트로 채워진다.

공법의 개선과 구조적 성능 향상을 위하여 PC 보와 PC 기둥의 접합면을 채우는 채움재 유형, 관통형 연결재 종류, 보 접합 단부의 콘크리트 구속효과를 설계 변수로 하였다(Table 1). 관통형 연결재는 고강도 강봉과 강선을

부착 없이 사용하였고 접합면은 네오프렌 패드 또는 무수축 모르타르로 채운 경우와 채움재 없이 보-기둥을 직접 맞댄 경우를 고려하였으며, 보 접합 단부의 콘크리트 구속효과는 탄소섬유시트(CFRP)로 보강한 경우와 그렇지 않은 경우를 아울러 고려하였다. 네오프렌 패드는 Fig. 2와 같이 보-기둥 접합면의 전단면을 채운 경우와 보-기둥 접합면의 밀착성을 증진시키기 위하여 상하부에만 채운 경우를 고려하였다.

실험체의 보와 기둥은 ACI 318-08의 내진 설계 기준⁷⁾에 의하여 설계하였다. 보와 기둥의 휨강도 비율은 2.6으로써 강기둥-약보(strong column-weak beam)로 설계하였다. 보의 접합 단부는 ACI 318-08의 설계 기준⁷⁾에 준하여 일반 RC와 같이 설계하여 연결재의 초기긴장 효과와 비부착 효과가 고려되지 않았다. 실험체 각 부분의 강도성능은 Table 2와 같으며 실험체 전체의 강도가 연결재 강도성능에 의하여 결정되도록 의도하였다.

PC 기둥의 단면 크기는 600×750 (mm)이고 콘크리트 공칭 압축강도는 45 MPa이다. 사용 철근의 재질은 SD40이며 주근과 전단 보강근의 직경은 각각 HD35와 HD16이다.

PC 보의 단면 크기는 400×700 (mm)이고 콘크리트 공칭 압축강도는 35 MPa이다. 사용 철근의 재질은 SD40이

Fig. 2 Components of specimens

Table 1 Components of specimens

Specimen	Thru_connector		Joint filler				Beam end block reinforcing w/CFRP
	HT bar	PS strand	Neoprene (t = 2 mm)		Mortar (t = 20 mm)	Direct contact	
			Full	Partial			
D0-B-T80	○					○	
D1-B-T80	○		○				○
D2-B-T80	○			○			
W1-B-T80	○				○		
D1-S-T72		○	○				

Table 2 Strength capacity ratio

Strength capacity		PC beam				PC column		Panel zone
		Flexure			Shear	Flexure	Shear	Shear
		End joint part		The other part				
		PT bar	PS strand	Steel				
Nominal strength	Pn	1.00	0.72	2.10	2.03	3.18	2.95	5.53

며 주근과 전단 보강근의 직경은 각각 HD32와 HD10이다. 보 접합 단부에서의 보의 주근은 정착 길이 확보를 위해서 U자형으로 가공하여 배근하였다(Fig. 3(a)). 전단 보강근은 폐쇄형 늑근을 사용하였고 접합면에서 50 mm 위치에서부터 100 mm 간격으로 배근하였다. 연결재인 고강도 강봉은 Semalloy 835, 강선은 SWPC 7B를 사용하였다(Fig. 3, Table 3). 관통형 연결재는 접합부의 초기강성을 확보하기 위하여 항복강도의 60%를 초기에 긴장하였고, 이는 PC 보 단면 압축강도의 20%에 해당된다.

Fig. 3 Reinforcement of specimens

Table 3 Material properties (unit : MPa)

Strength	Concrete		Mild steel				Thru-connector	
	Column	Beam	HD10	HD16	HD32	HD35	HT bar	PS strand
Nominal	45.0	35.0	400.0				835.0	1,200
Material test	53.6	42.2	529.5	505.5	496.5	509.0	1,030.0	-

2.2 계측 및 가력

실험체는 Fig. 4(a)와 같이 ‘+’형 실험체의 보와 기둥 단부를 회전 지점으로 설치하였다. 내진성능 평가를 하기 위해 기둥 상부에 수평 방향으로 최대 가력하중이 2,000 kN, 양방향 최대변위가 300 mm인 액추에이터(actuator)를 설치하였다. ACI T1.1R-01의 가력 프로그램을 참고하여 Fig. 4(b)와 같이 액추에이터를 drift 5.5%까지 변위제어하여 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 결과 및 파괴양상

3.1.1 파괴양상

모든 실험체들이 콘크리트 압축파괴의 양상을 보여주고 있다(Fig. 5). PC 보의 접합 단부 모서리 손상과 콘크

Fig. 4 Boundary conditions and loading program

(a) Drift 4.0% : concentrated failure of beam corner

(b) Drift 2.0% : spalling of beam covering

(c) Drift 4.0% : spalling of bottom covering

Fig. 5 Typical failure pattern (W1-B-T80)

리트 피복이 심하게 박리된 것이 관찰되었다. 이에 반하여 PC 기둥과 접합부 판넬존에서는 약간의 사인장 균열이 발생했을 뿐 특별한 손상은 관찰되지 않았다.

Fig. 6은 실험체별 균열 및 파괴양상을 하중-층간변위비 곡선에 나타난 그림이며 Table 4는 그 내용을 표로 정리한 것이다. PC 보-기둥 연결재로서 고강도 강봉을 사용한 실험체 D0-B-T80, D1-B-T80, B2-B-T80, 그리고

Fig. 6 Crack and story drift relationship

W1-B-T80은 층간변위비(story drift)에 따른 균열양상이 유사한 형태를 보였다. Drift 0.5%에서 보의 휨 균열과 기둥 판넬존의 사인장 균열이 시작하여 drift 1.0%까지 균열이 증가하였다. 기둥의 판넬존에 발생한 사인장 균열은 drift 1.0% 이후부터 더 이상 균열이 증가하지 않았다.

Drift 1.5%에서 보 접합 단부 모서리에 균열이 발생하였고 drift 2.0%에서부터 모서리 박리가 관찰되었다.

맞댐 실험체인 D0-B-T80과 무수축 모르타르 채움 실험체인 W1-B-T80은 drift 1.5%와 drift 2.0%에서 보 접합 단부의 하부 콘크리트 피복 균열 및 박리가 발생했다. 이러한 콘크리트 손상이 발생한 시점에서 하중-층간변위비 곡선에서는 급격한 강도저하를 보였다.

보 접합 단부에 CFRP로 보강을 한 실험체 D1-B-T80은 drift 3.5%에서 CFRP가 끊어짐으로 인해 보강된 부분의 콘크리트 손상을 관측할 수 있었다. 구속 효과로 인해 하중-층간변위비 곡선에서도 다른 실험체에 비해 높은 연성을 보였다.

PC 보-기둥 연결재로 강선을 사용한 실험체 D1-S-T72는 drift 0.5%에서 보 접합 단부 모서리 박리가 관찰되었다. Drift 1.5%에서 보의 휨 균열과 기둥 판넬존의 사인장 균열이 발생했으며 양쪽 보의 비대칭 손상이 관찰되었다.

Table 4 Experimental results

Specimen	Story drift (%)								
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
D0-B-T80	○ △	● ▲	◆ □	■				◆ ■	
D1-B-T80	○ △	● ▲	◇				◆ ■		■
D2-B-T80	○ △	● ▲	□	■	◇		◆		◆ ■
W1-B-T80		● ▲		◆ ■				◆ ■	
D1-S-T72	■	○ ◇	● ▲				■		
Panel zone	○		● diagonal tension crack						
Beam covering	◇		◆ spalling						
Beam corner	□ microcrack		■ spalling					■ failure	
Other parts of beam	△		▲ flexural crack						

3.1.2 하중-층간변위비 이력거동

Fig. 7은 하중-층간변위비 이력곡선을 나타낸다. 모든 실험체들이 콘크리트 압축파괴의 양상을 보인 것에 상응하여 이력곡선이 최대하중 이후에 급격한 강도저하를 나타낸다.

맞댐 실험체인 D0-B-T80과 무수축 모르타르 채움 실험체인 W1-B-T80의 최대하중은 drift 1.5%에서 각각 546 kN, 575 kN이다. 다른 실험체에 비해 높은 강도 성능과 초기강성을 나타내며 PC 보-기둥 실험체의 일반적인 현상인 핀칭 거동이 관찰된다.

접합면에 네오프렌 패드를 삽입한 실험체인 D1-B-T80과 D2-B-T80, D1-S-T72는 D0-B-T80과 W1-B-T80에 비해 강도 성능과 초기강성이 높지 않지만 초기에 핀칭 현상이 거의 발생하지 않았고 반복하중에 의한 에너지 소산 능력이 우수하다. 이것은 초기 긴장에 의하여 접합면의 네오프렌 패드가 압축되어 PC 보-기둥의 접합면의 밀착성을 높임으로써 핀칭 현상을 완화시키고 에너지 소산 능력을 향상시킨 것으로 판단된다.

네오프렌 패드를 삽입한 실험체 중에서 CFRP로 구속 효과를 준 실험체 D1-B-T80은 그렇지 않은 실험체에 비해 최대강도 이후의 강도저하가 서서히 일어남을 알 수 있다.

3.2 관통형 연결재로 연결된 PC 보-기둥 맞댐 접합부의 역학적 거동

실험 결과에 따르면 접합부는 일반적으로 PC 보 단부의 콘크리트가 휨 모멘트에 의한 압축파괴 양상을 보이고 있다. 이러한 파괴 양상은 관통형 연결재의 초기긴장에 의한 PC 보 단부의 압축 효과와 비부착 효과에 의한 것으로 보인다. 이를 구명하기 위하여 보 단부에서 초기압축 효과와 비부착 효과를 포함한 접합부의 휨 거동을 무수축 모르타르 채움 실험체의 실험 결과와 비교,

분석해보고자 한다.

3.2.1 휨모멘트 해석

Fig. 8은 관통형 볼트로 연결된 PC 보-기둥 맞댐 접합부에 휨 모멘트가 작용할 때의 변형과 이 때, 보 접합단부에서 발생하는 부재력과 응력을 나타낸다. Fig. 9(a)는 PC 보 단부 접합면에서의 콘크리트와 관통형 연결재의 변형을 나타낸다.

접합부 조립을 할 때, 가해지는 초기긴장에 의하여 콘크리트와 연결재는 각각 ϵ_{c0} 와 ϵ_{ps0} 의 초기변형을 하게 된다. 또한 외부에서 휨모멘트가 작용하면 완전부착을 가정할 경우 콘크리트와 연결재는 각각 ϵ_{c0}' 와 ϵ_{ps}' 의 변형을 추가로 하게 된다. 그러나 연결재는 비부착 거동을 하기 때문에 단면에서 슬립이 발생하게 된다. 이러한 단면에서 적합조건의 불일치는 부재의 변형과 비교하여 보정해야 한다. 길이 2 m인 보에서 슬립에 영향을 받는 범위는 보 단부 0.5 m에 국한되므로 슬립효과는 미비할 것으로 보인다. 그러나 슬립효과를 고려하기 위한 계수 η 로 휨 변형을 보정하고, 콘크리트의 초기변형률의 영향을 고려하면 각 위치에서 연결재에 발생하는 인장변형률은 식 (1), (2)로 정리된다.

Fig. 8 Mechanical behavior for post-tensioned PC beam with unbonded thru-connectors

Fig. 7 Hysteresis curves

부에서 발생하고, 연결재의 인장변형은 비부착 효과로 인하여 동일한 크기의 변형률이 연결 구간 전체에 걸쳐 발생한다. 이를 고려하여 연결재의 인장변형과 콘크리트의 압축변형은 식 (9)와 (10)과 같다.

$$\Delta_{c,ps1}' = 2(\varepsilon_{c,ps1}'L_2)\frac{L_1}{d-d'} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{ps1}' &= \Delta_{ps1}'' + \Delta_{c,ps1}' - \Delta_{t,ps1}' \\ &= 2(\varepsilon_{ps1}'(2L_2 + h_c) + \varepsilon_{c,ps1}'L_2 - \varepsilon_{t,ps1}'L_2)\frac{L_1}{d-d'} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 Δ_{ps1}'' : 연결재 자체의 인장변형량
 $\Delta_{t,ps1}'$: 콘크리트의 인장변형 회복
 L_2 : 보 접합면에서부터 지점까지의 길이
 h_c : 기둥 폭
 $\varepsilon_{c,ps1}'$: 연결재 부분에서 콘크리트 압축변형률
 $\varepsilon_{t,ps1}'$: 연결재 부분에서 콘크리트 인장변형률

보 연결부 변형에 의한 보의 휨 변형은 식 (8)에 식 (9), (10)을 대입하고, 식(1)과 (2)에서 중립축 거리 x 를 대입하여 정리하면 식 (11)과 같다.

$$x \geq d \text{ 인 경우,} \\ \Delta_{ps} = \left(\varepsilon_c \left(1 - \frac{d'}{x} \right) + 1.25 \varepsilon_c \left(\frac{d}{x} - 1 \right) + 0.25 \varepsilon_{c0} \frac{2L_1L_2}{d-d'} \right) \quad (11)$$

$$x < d \text{ 인 경우,} \\ \Delta_{ps} = \left(\varepsilon_c \left(1 - \frac{d'}{x} \right) + 1.75 \varepsilon_c \left(\frac{d}{x} - 1 \right) + 0.25 \varepsilon_{c0} \frac{2L_1L_2}{d-d'} \right)$$

또한 보와 기둥의 휨 변형은 식 (12)과 (13)에 의하여 구하며 판넬존의 전단변형은 식 (14)로 구해진다.

$$\Delta_b = 2 \frac{V_b L_1^3}{3 E_b I_b} = 2 \frac{PH}{L} \frac{L_1^3}{3 E_b I_b} \quad (12)$$

$$\Delta_c = 2 \frac{PH_1^3}{3 E_c I_c} \quad (13)$$

$$\Delta_j = \frac{PH^2}{G_j b_c h_c h_b} \left(1 - \frac{h_c}{L} \right) \left(1 - \frac{h_b}{H} - \frac{h_c}{L} \right) \quad (14)$$

여기서 $E_b I_b$: 보 휨 강성
 $E_c I_c$: 기둥 휨 강성
 G_j : 전단 탄성 계수
 b_c : 기둥-보 접합면의 기둥 깊이
 h_b : 보 춤

3.2.3 해석 결과의 비교

채움재의 영향을 가장 적게 받는 강봉으로 연결된 무수축 모르타르 채움 실험체 W1-B-T80의 실험 결과와 위에서 정리한 이론식을 보 연결부 변형에 의한 보의 휨 변형에 대해 비교하였다. 더불어 휨 모멘트에 의한 거동을 비교, 분석하기 위하여 다음과 같은 사항들을 가정하였다.

- 강봉의 탄성계수 $E_s = 2.1 \times 10^5$ MPa을 사용하고 완전 탄소성체로 가정
- 콘크리트의 극한변형률 $\varepsilon_{cu} = 0.003$ 으로 가정
- 콘크리트는 응력 블록 계수 α , β 를 산정¹⁰⁾하여 휘트니(Whitney)의 등가 응력블록으로 계산
- 보정계수 η 는 보에서 휨모멘트가 선형으로 변화하고, 연결재의 비부착 구간 0.5 m와 보의 스패น 2.0 m 비를 고려하여 0.875로 가정
- 보와 기둥의 휨 변형과 기둥 판넬존의 변형은 탄성 범위로 가정

Table 5는 식 (5)에 의해 구해진 최대 휨 강도를 기둥 상부에 작용한 수평하중으로 환산하여 실험에서 계측된 결과와 비교한 것이다. D0-B-T80과 W1-B-T80의 계측된 최대강도는 해석 결과의 93%와 94%를 만족한다. 네오프렌 패드를 삽입한 실험체 중에 D2-B-T80과 D1-S-T80은 각각 86%와 67%를 만족하지만 보 단부에 CFRP로 구속효과를 준 실험체 D1-B-T80은 91%를 만족함을 알 수 있다.

Fig. 10은 실험체 W1-B-T80의 실험 결과와 해석 결과를 층간변위비에 대한 수평가력하중과의 관계로 비교한 것이다. 실험 결과에 의하면 drift 1.16%에서 최대 수평하중이 575.36 kN이고 해석 결과는 drift 1.10%에서 최대 수평하중 570.15 kN이다. 최대하중에 도달하기 전까지 변형에 대한 값도 거의 비슷하게 일치하는 것을 알 수 있다.

그리고 실험 결과와 해석 결과에 의하면 최대 수평하중이 작용할 때 강봉의 변형률이 각각 0.0041과 0.0045로 나타나 항복상태에 도달하지 못한 것으로 분석되었다.

Fig. 11은 보 연결부 변형에 의한 보의 휨 변형을 비롯한 보, 기둥의 휨 변형이 전체 층간변위비에 기여한 정도를 나타낸 그래프이다.

보 연결부 변형에 의한 보의 휨 변형 기여도는 drift

Table 5 Strength capacity ratio for specimens

Specimen	Calculated maximum strength (kN)	Experimental maximum strength (kN)		Avg. exp. strength Calc. max. strength
		Pos.	Neg.	
D0-B-T80	570.2	546.0	518.7	0.93
D1-B-T80		502.5	530.0	0.91
D2-B-T80		473.7	507.6	0.86
W1-B-T80		575.4	497.2	0.94
D1-S-T72	515.9	318.5	377.7	0.67

* Strength was obtained by nominal stress

* Pos. : positive direction

* Neg. : negative direction

Fig. 10 Comparison with the test and analysis

0.1%일 때도 55%정도로 보, 기둥의 휨 변형에 의한 기여도 보다 높으며, 층간변위비가 커짐에 따라 전체 변형에 기여하는 정도가 85%이상으로 증가함을 알 수 있다. 보 연결부 변형이 전체 변형에 기여하는 정도가 큰 것은 연결재의 인장변형이 비부착 효과로 인하여 연결구간 전체에 걸쳐 균일하게 발생하기 때문임을 알 수 있다.

3.3 내진성능평가

3.3.1 강도성능

Fig. 12는 실험체별 휨 강도 곡선과 해석에 의한 최대 강도를 나타내는 그래프이다. 실험체들은 관통형 연결재의 초기긴장과 비부착 효과에 의하여 최대강도 이후에 급격한 강도저하를 보인다. 특히 이러한 강도저하는 실험체 D0-B-T80과 W1-B-T80에서 뚜렷하게 관찰된다. 구속 효과를 준 실험체 D1-B-T80은 최대강도 이후에 다른 실험체에 비해 서서히 강도저하를 보인다.

보-기둥 접합면에 네오프렌 패드를 삽입한 실험체와 강선을 연결재로 사용한 실험체 D1-S-T72는 최대강도 이전의 기울기가 다른 실험체에 비해 완만하다.

Table 6은 drift 3.5%에서 실험체의 보유강도를 분석한 결과이다. 보 기둥 접합면에 네오프렌 패드를 삽입한 실험체가 그렇지 않은 실험체보다 전반적으로 강도저하가 작게 발생하여 큰 강도를 보유함을 알 수 있다. 특히

Fig. 12 Load-story drift relationship

CFRP로 구속효과를 준 실험체 D1-B-T80은 구속효과 없이 보-기둥 접합면에 네오프렌 패드를 삽입한 실험체보다 약 1.5배 우수한 강도성능을 보인다.

Fig. 13은 drift 3.5%의 세 번째 사이클에서의 최대하중이 실험체 최대하중의 75% 이상을 만족할 것을 요구하는 내진성능평가기준과 비교한 것이다. 막대그래프에 나타난 것과 같이 특수모멘트골조에서 요구되는 내진성능평가기준¹¹⁾의 요구강도성능에는 모두 못 미친다. 그러나 중간모멘트 골조에서는 drift 2.5%에서 최대 하중이 실험체 최대하중의 75% 이상을 만족하면 되며 D1-B-T80은 그래프와 같이 중간모멘트 골조의 성능을 보유하고 있는 것으로 볼 수 있다.

3.3.2 초기강성

Table 7은 위의 기준에 따라 평가한 각 실험체별 초기강성 성능을 정리한 표이다. 설계 최대강도에 도달하지 못한 실험체는 최대강도에서의 층간변위비를 산정하기 위해서 첫 번째 사이클 최대하중의 할선 기울기를 구하였다. 맞댐 접합 실험체 D0-B-T80과 무수축 모르타르 채움 실험체 W1-B-T80은 접합면에 네오프렌 패드를 삽입한 실험체보다 높은 초기강성을 보이는 것으로 분석되었다. 초기강성에 대한 내진성능평가기준¹¹⁾에서는 초기 층간변위비를 건물의 내진 사용등급에 따라 0.003~0.005를 기준으로 정하고 있다. 모르타르 채움 실험체 W1-B-T80

Fig. 11 Comparison with displacement contribution

Table 6 Strength degradation

Specimen	P_{max} (kN)	$P_{3.5}$ (kN)	$P_{3.5}/P_{max}$	$P_{2.5}$ (kN)	$P_{2.5}/P_{max}$
D0-B-T80	546.0	160.3	0.29	356.6	0.65
	-518.7	-185.4	0.36	-407.0	0.78
D1-B-T80	502.5	339.6	0.68	502.1	1.00
	-530.0	-287.3	0.54	-515.4	0.97
D2-B-T80	473.7	165.1	0.35	408.6	0.86
	-507.6	-162.4	0.32	-308.1	0.61
W1-B-T80	575.4	217.7	0.38	369.2	0.64
	-497.2	-224.9	0.45	-340.7	0.69
D1-S-T72	318.5	144.9	0.45	277.3	0.87
	-377.7	-175.6	0.46	-296.9	0.79

Fig. 13 Strength degradation ratio

이 사용등급 I에 적합하고 여타의 실험체는 초기강성이 부족함을 알 수 있다.

3.3.3 강성저하

Fig. 14는 각각 반복 가력에 따른 실험체별 강성저하를 나타낸 그래프이다. Fig. 14의 y축은 첫 번째 사이클의 강성인 K_1 에 대한 각 가력 단계의 강성 K 의 상대적인 강성비이다. 또한 Table 8은 drift 3.5%의 세 번째 사이클에서 상대적인 강성비를 나타낸 것이다.

분석 결과에 따르면 CFRP로 구속효과를 준 실험체 D1-B-T80과 강선을 연결재로 사용한 실험체 D1-S-T72의 강성저하 성능이 가장 우수하였다.

강성저하에 대한 내진성능평가기준¹¹⁾에서는 drift 3.5%의 세 번째 사이클에서 초기강성에 대한 상대적인 강성비가 5% 이상을 유지하도록 요구하고 있다. 실험체 W1-B-T80의 부 가력방향 강성저하를 제외한 모든 실험체가

Table 7 Initial stiffness

Specimen	Calculated strength (kN)	Experimental strength max. (kN)	Drift (%)	Criterion
D0-B-T80	570.2	546.0	0.59	Seismic use group I < 0.5% II < 0.4% III < 0.3%
D1-B-T80		502.5	0.80	
D2-B-T80		473.7	0.65	
W1-B-T80		575.4	0.51	
D1-S-T72	515.9	318.5	1.08

Fig. 14 Stiffness degradation

강성저하에 대한 기준을 만족하는 것으로 분석되었다.

3.3.4 에너지소산능력

Fig. 15와 Table 9는 각각 실험체별 에너지소산율을 나타내는 그래프와 표이다. 내진성능평가기준¹¹⁾에서는 drift 3.5%의 세 번째 사이클에서 실제 소산된 에너지와 탄소성 구조로 가정했을 경우의 소산할 수 있는 에너지의 비가 0.125를 초과할 것을 요구한다. 보-기둥 접합면에 네 오프렌 패드를 삽입한 실험체 D1-B-T80과 D2-B-T80, D1-S-T72의 에너지소산율은 각각 0.134, 0.118, 0.131로 에너지소산능력이 다른 것에 비하여 우수한 것으로 분석되었다. 반면에 무수축 모르타르 채움 실험체 W1-B-T80과 맞댐 접합 실험체 D0-B-T80은 에너지소산능력이 미흡한 것으로 분석되었다.

4. 결 론

관통형 연결재로 연결된 PC 보-기둥 맞댐 접합 형식에 대하여 실험을 통해 내진 성능을 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 실험체에 외부에서 휨 모멘트가 작용할 때 모든 실험체가 PC 기둥의 손상은 거의 없이 PC 보의 단부에서 파괴가 발생하였으며 보 접합 단부에서 콘크리트 압축파괴 양상을 보였다. 보 단부에서 압축파괴가 발생하는 원인은 관통형 연결재에 작용하는 초기 긴장력과 비부착 효과에 의하여 보 단부 콘크리트에 압축력이 증가되는 현상에 의한 것으로 분석되었다. 파괴모드를 개선하기 위하여 보 단부 콘크리트의 압축 성능을 개선할 필요가 있으며 보 단부 콘크리트에 구속효과를 주거나 보 단부 접합면

Table 8 Stiffness degradation capacity

Specimen	$K_{\text{Drift3.5\%}} / K_{\text{Initial}}$		Criterion
	Positive	Negative	
D0-B-T80	0.05	0.07	$K_{\text{Drift3.5\%}} \geq 0.05K_{\text{Initial}}$
D1-B-T80	0.15	0.08	
D2-B-T80	0.05	0.05	
W1-B-T80	0.05	0.04	
D1-S-T72	0.13	0.10

Fig. 15 Relative energy dissipation ratio

Table 9 Relative energy dissipation ratio

Specimen	Relative energy dissipation ratio (drift 3.5%)						Criterion	
	Hysteresis curve area (drift 3.5%)			Parallelogram area				Relative energy dissipation ratio
	The upper part	The lower part	Sum	The upper part	The lower part	Sum		
D0-B-T80	48	53	101	575	771	1346	0.075	Above 0.125
D1-B-T80	137	137	275	1575	962	2047	0.134	
D2-B-T80	78	61	139	601	583	1185	0.118	
W1-B-T80	70	60	130	787	849	1636	0.079	
D1-S-T72	70	74	144	509	592	1101	0.131	

- 에 철판을 보강하는 등의 공법을 적용할 수 있다.
- 2) 건식공법을 위한 연결부 채움재로 네오프렌 패드를 사용한 접합부는 초기강성이 다소 부족하나 에너지 소산능력 등 내진성능은 우수한 것으로 분석되었다. 특히 보 접합 단부를 CFRP로 구속할 경우 보 단부 콘크리트 구속에 의한 내진성능 개선효과가 있음을 알 수 있다. 반면에 무수축 모르타르 채움을 사용한 접합부는 초기 강성은 양호했으나 에너지 소산 등 내진성능은 상대적으로 불리한 것으로 분석되었다.
 - 3) 보 연결부 변형에 의한 보의 휨 변형도가 전체 층간 변형에 기여하는 정도는 초기에 50%에서 85%에 이르는 것으로 분석되었다. 이는 비부착 효과로 인하여 연결재의 인장 변형이 연결구간 전체에 걸쳐 균일하게 발생하기 때문이다. 공법의 편리함을 위하여 연결재를 비부착으로 사용하기 위해서는 연결재의 변형을 제한적으로 조절할 수 있는 기구를 설치함으로써 층간 변형에 기여하는 정도를 조절할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(과제번호 D00792), 국토해양부 가스플랜트사업단의 연구비 지원을 통해 이뤄졌으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. Cheok, G. S. and Lew, H. S., "Model Precast Concrete

- Beam to Column Connections Subjected Cyclic Loading," *PCI Journal*, Vol. 38, No. 4, 1993, pp. 80~92.
2. Stone, W. C., Cheok, G. S., and Stanton, J. F., "Performance of Hybrid Moment-Resisting Precast Beam-Column Concrete Connections Subjected to Cyclic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 2, 1995, pp. 229~249.
3. Priestley, M. J. N. and Tao, J. R., "Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames with Partially Debonded Tendons," *PCI Journal*, Vol. 38, No. 1, 1993, pp. 58~66.
4. Tani, M., "Ultimate Flexural Strength Evaluation for Prestressed Concrete Columns," *Fumio Watanabe Symposium*, Kyoto, 2008, pp. 281~289.
5. 여인석, "PCS 구조 시스템의 내진 성능 분석," 콘크리트 학회 논문집, 19권, 3호, 2007, pp. 313~322.
6. 김무경, "PCS 구조 시스템 접합부의 초기 강성에 대한 연구," 콘크리트학회 논문집, 20권, 3호, 2008, pp. 271~282.
7. ACI, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary (Chapter 21)," *ACI Manual of Concrete Practice (Part3)*, 2008, pp. 323~349.
8. Lin, C. M., "Seismic Behavior and Design of Reinforced Concrete Interior Beam Column Joints," Department of Civil Engineering University of Canterbury Christchurch, New Zealand, 2000, pp. 298~306.
9. 서수연, 이리형, 진세옥, 최윤철, "강한 기동-약한 보로 설계된 철근 콘크리트 골조구조의 변형성능 평가에 관한 연구," 한국구조물진단학회, 7권, 4호, 2003, pp. 225~233.
10. Collins, M. P. and Mitchell, D., *Prestressed Concrete Structures*, Prentice-Hall, New Jersey, 1991, pp. 175~18.
11. ACI T1.1R-01, "Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing," *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, 2002, pp. 1~7.

요 약 건식공법이 가능하도록 기존의 접합 방식과 차별화 되는 PC 보-기둥 접합부를 개발하여 실용화하기 위한 기초 연구이다. 연속된 PC 기둥 양편에 위치한 보의 접합 단부를 고강도 관통형 연결재로 긴장하여 연결하는 'PC 보-기둥 맞댐 접합(BCJ_TB : precast beam column joints connected with thru-connects)'을 고안하고 실험적 연구를 수행하여 강도저하, 초기강성, 강성저하, 에너지소산능력 등의 내진성능을 분석하였다. 실험 결과에 기둥에서는 손상이 발생하지 않고 보 단부에서 압축파괴가 발생하는데, 이는 비부착 연결재의 초기긴장과 비부착 효과에 의하여 보 단부 콘크리트에 압축응력이 증가하기 때문인 것으로 분석되었다. 보 접합 단부에 CFRP로 구속 효과를 준 접합부의 성능이 상대적으로 우수하였고 네오프렌 패드로 보 기둥 접합면을 연결한 것이 다른 것에 비하여 초기강성을 제외하고는 우수한 내진성능을 보이는 것으로 분석되었다. 비부착 연결재를 사용한 접합부의 파괴모드를 개선하기 위하여 보 단부 콘크리트의 압축 성능을 향상시키고, 연결재의 변위를 적절히 조절할 수 있는 방법이 요구된다.

핵심용어 : PC 구조, 기둥-보 접합부, 관통형 연결재, 비부착, 포스트 텐션