

저자 (Authors)	최현기, 최창식 Hyun-Ki Choi, Chang-Sik Choi
출처 (Source)	<a href="#">콘크리트학회 논문집 26(4)</a> , 2014.8, 545-553(9 pages) <a href="#">Journal of the Korea Concrete Institute 26(4)</a> , 2014.8, 545-553(9 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국콘크리트학회</a> Korea Concrete Institute
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02505668">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02505668</a>
APA Style	최현기, 최창식 (2014). 변형기여분에 따른 프리캐스트 보-기둥 접합부의 분류방안. 콘크리트학회 논문집, 26(4), 545-553
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.104.66.*** 2022/02/18 17:25 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.



## 변형기여분에 따른 프리캐스트 보-기둥 접합부의 분류방안

최현기<sup>1)</sup> · 최창식<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>경남대학교 소방방재공학과 <sup>2)</sup>한양대학교 건축공학과

### Classification Schemes of Precast Beam-Column Connections According to Contribution of Deformation Components

Hyun-Ki Choi<sup>1)</sup> and Chang-Sik Choi<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept of Fire and Disaster Prevention Engineering, Kyungnam University, Changwon 631-701, Korea

<sup>2)</sup>Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**ABSTRACT** This study suggested an integrated classification method for generalized characteristics of PC beam-column connection according to connection details. Quantifying the failure mode of PC-beam column connection and characteristics of corresponding details, this study suggested to use deformation contribution of each element of beam-column assemblage. According to the expected failure mode of beam-column connection assemblage, PC beam-column connection can be classified into ‘equivalent monolithic system’ and ‘jointed system’. In this study, four test specimens were tested for verification of detailed classification method of PC beam-column connections. Test was carried out with typical beam-column connection test method. Load was applied at the top of test specimen and end of beams were restrained by hinge. In order to verify the deformation contribution of each test specimen, 34-LVDTs were mounted on test specimen. According to test results, deformation contribution of each test specimen have different characteristics. Deformation characteristics of joint and other components which are quantified by test results, equivalent monolithic system can be classified into two categories. Strong connection have extremely small deformation contribution of joint and much larger deformation contribution was shown in flexural behavior of beam. The other type of beam-column connection is ductile connection which allows the larger deformation in joint area compared with strong connection.

**Keywords :** precast concrete, beam-column connection, contribution of deformation components, classification scheme, performance evaluation

### 1. 서 론

프리캐스트 콘크리트(precast concrete 이하 PC)는 구조물의 안전성, 내구성, 신뢰성, 고품질, 비용절감 효과를 위한 실용적인 수단으로 널리 채택되어 왔다. 그러나 연결부위에 대한 시공성 및 경제성확보의 어려움과 설계지침의 미비로 인하여 지진지역에서의 완전한 적용은 다소 제한되어왔다. PC 구조 사용에 있어 현장타설 RC 구조의 사용을 권장하는 관례적 조항은 지진지역에서의 사용을 주저하게 하고 있으며, 이러한 세부 설계조건은 현장타설 RC 구조와 같은 높은 에너지소산능력과 연성능력을 확보하기 위한 표준 방법론을 제시하게 되었다. 이는 강진 이후에도 구조물이 붕괴되는 것을 방지하기 위해

큰 비탄성 변형을 경험한 후 결합부의 높은 에너지 흡수능력을 요구하고 있으며 일정 수준의 강도 저감을 제한하고 있다.<sup>1)</sup> 이와 같이 일체식 구조와 동등한 성능을 요구하는 조항은 PC 구조를 현장에 적용하는데 큰 제약이 되었다.

일반적으로 철근콘크리트 보-기둥 접합부는 전단력과 부착력에 의해 지배되며, 지진하중과 같은 심각한 비탄성 변형을 일으키는 반복주기 하중을 경험할 경우 구조물 전체의 붕괴로 이어질 가능성이 높다.<sup>2)</sup> 이에 접합부 또는 기둥의 파괴를 방지하기 위해 인접 보 부재의 휨 항복이 선행되도록 유도하는 것이 현재의 설계방법론이다. 모멘트 저항 골조에 있어 탄성이후 연성 변형을 유도하는 가장 좋은 방법은 적절한 설계 소성 힌지의 선택이며, 설계 소성힌지는 충분한 연성과파괴를 유도할 수 있다. 이는 휨에 대한 파괴가 연성을 위해 설계되지 않은 구조 부분에서(예를 들어 접합부) 일어나게 하지 않고, 접합부에서 전단 파괴가 일어나지 않도록 해야 한다. 이는 항복

\*Corresponding author E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr

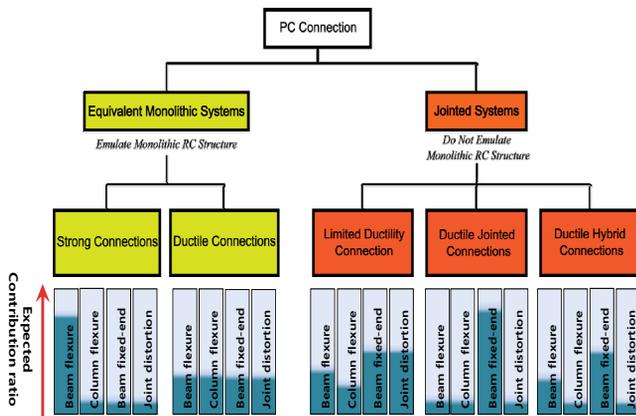
Received April 24, 2014, Revised June 20, 2014,

Accepted June 20, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Classification schemes

Classification schemes of precast beam-column connections		
Classification by characteristic of connection behavior	Classification by characteristic of connection details	Qualitative analysis of classification schemes
Global behavior & local behavior	Equivalent monolithic system	Strong connection
		Ductile connection
	Jointed system	Limited ductility
		Hybrid
Rocking		
Performance index		Testing method
1. Joint shear distortion and strength 2. Connection rigid rotation and bar stress 3. Elastic deformation 4. Inelastic deformation		1. Evaluation of deformation ratio by proposed testing method 2. Performance evaluation by ACI 374



**Fig. 1** Concept of classification

강도 보다 높은 종 방향 철근의 실제 항복강도를 포함한다. 결과적으로, 소성힌지 영역에 대한 전단 보강근과 소성힌지 구간으로부터 떨어진 구조 부분의 보강근, 소성힌지 영역에서 초과강도 휨 작용에 대한 설계는 취성 파괴를 예방하기 위함이다.<sup>3-5)</sup>

그러나 이러한 가이드라인은 PC 구조의 제약조건으로 받아들여지고 있으며, 자유로운 설계 및 접합 공법개발에 있어 시공성 및 경제성이 낮아 현장 적용에 문제점이 되고 있다. 이에 이 연구에서는 기 개발된 PC 보-기둥 접합 상세별 특성을 알아보고, 각 상세가 갖고 있는 특성을 정규화하여 표준화된 분류체계를 마련하고자 한다. 접합부 특성(접합상세)을 적절히 고려할 수 있는 정량적 가이드라인인 PC 보-기둥 접합부 분류체계는 각 접합부의 성능 수준(변형능력의 정도)을 지정함으로써 PC 구조의 합리적 설계방법론 마련을 위한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

## 2. PC 보-기둥 접합부의 분류

### 2.1 접합부의 분류 기준

PC 보-기둥 접합부는 다양한 연결 상세가 존재함에 따라 부재의 강도에 의한 분류가 불가능하다. 이에 따라 ACI 374에서는<sup>6)</sup> 강성과 에너지 조항을 강도와 함께 제시하여 보-기둥 접합부의 성능을 정의하고 있다. 그러나 모멘트 저항 골조의 하중 저항 매커니즘은 각 부재가 보유하고 있는 강도 및 강성뿐만 아니라 소성힌지의 발생 위치 및 소성힌지의 변형능력 등을 고려하여야 한다. 즉, 모멘트 저항골조의 비탄성 거동은 설계 소성힌지 발달을 유도하는 것이다. 이러한 소성힌지 발생 위치와 접합부의 파괴기준은 설계자 및 각 접합상세가 갖고 있는 특성을 잘 반영하고 있다. 이에 이 연구에서는 소성힌지 발생 위치와 접합부의 파괴 기준에(변형의 정도) 근거하여 PC 보-기둥 접합부의 분류체계를 제안하였다. PC 모멘트 저항골조는 PC 구조 특성 상 각 요소가 분리되어 있으며 각 요소에서 발생하는 변형량에 대한 시스템 전체 변형량의 비율을 통해 PC 접합부의 특성을 정의할 수 있도록 하였다.

PC 구조 시스템은 PC 부재 사이의 접합부 설계 개념에 따라 일체식 접합부(equivalent monolithic connection) 연결식 접합부(jointed connection) 구분할 수 있다. 일체식 접합부는 지진하중 하에서 구조 시스템이 현장 타설 일체식 구조와 동등한 성능을 갖도록 구성하는 것이다. 현장 타설 구조와 같은 수준의 구조일체성을 확보할 수 있는 접합상세를 갖고 있다면 재료 성능에 기반한 구조 설계를 수행할 수 있다.<sup>7,8)</sup>

연결식 접합부는 PRESSS program에 의해 제시되었다. 연결식 접합부는 부재 간 접합이 PC 부재보다 약하게 설계되며, 연성적 비탄성 변형이 발생하도록 설계되어야 한다. 만약 PC 결합에 있어 별도의 에너지소산 장치를 설치할 경우, 연성적인 접합부 요소보다 충분한 강도 여력을 갖고 있다면, 프리캐스트 요소는 지진 하중 하에서도 탄성적으로 남아있게 되며, 결과적으로 프리캐스트 요소 자체의 연성 설계에 대한 부담이 감소하게 되어 횡보강강감소 및 부재 크기의 감소와 같은 경제적인 설계를 가능하게 할 수 있다. 그러나 일체식 접합부에 비해 연결식 접합부의 경우 거동 및 설계 방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 설계 의도보다 과도한 지진 하중에 대한 제한적인 연성능력 확보에 대한 정량적 가이드라인은 없다.<sup>9)</sup>

PC 보-기둥 접합부는 다양한 연결 상세가 존재함에 따라 부재의 강도등과 같은 평가기준으로는 분류가 불가능하다. PC 접합부에 대한 설계기준 및 기존연구 결과<sup>12-14)</sup>에 따르면, 지진하중에 충분한 에너지를 흡수하고 강도를 발현하기 위한 거동의 형태는 세 가지 형태로 구분된다. 이는 하중과 변위(또는 중간변위) 관계에 의해 표현

될 수 있다. 일체식 접합부에 준하는 접합상세(강한접합부 및 연성접합부)를 갖는 경우 큰 비탄성 변형이 발생하며 소산시킬 수 있는 에너지의 양이 크다. 이에 반해 연결식 접합부(하이브리드 접합상세 등)는 탄성 변형 형태로 거동하지만 에너지를 소산시킬 수 있는 영역이 작은 것으로 나타났다. 이는 접합부와 주변 부재의 변형 정도로서 정의가 가능하다.

이 연구에서는 Fig. 2와 같이 각 변형성분의 분포 정도와 변형저항성능을 기반으로 일체식 접합부에 준하는 성능 및 거동을 하는, 강한 접합부(접합부의 변형성능이 우수하여 접합부의 변형이 발생하지 않음)와 연성접합부(접합부의 변형성능이 우수하나 접합부의 변형이 발생함) 분류하였으며, 접합부 계면에서의 비탄성 변형을 허용하며 별도의 연결 장치에 의한 성능향상을 의도하는 연결식접합부로 분류하였다.

### 2.3 변형기여도의 산정

접합부의 전단변형량 산정은 Fig. 2(a)과 같이 접합부의 변형이 기둥의 이동을 일으키는 것으로 가정하여 식 (4)와 같이 전체 변위에 대한 접합부의 변형 기여분을 산출할 수 있다.

$$\gamma_1 = \tan \frac{x}{d} \approx \frac{h - \sqrt{(D - \delta_1)^2 - d^2}}{d} \quad (1)$$

$$\gamma_2 = \tan \frac{y}{d} \approx \frac{\sqrt{(D - \delta_2)^2 - d^2} - h}{d} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (3)$$

$$\Delta_J = \gamma H \quad (4)$$

여기서,  $H$ 는 보의 깊이이다. 기둥과 보의 휨 변형은 기둥과 보의 길이 방향으로 상 하부에 설치해둔 LVDT의 변

위를 통해 구할 수 있는 곡률을 기반으로 계산할 수 있다. 곡률은 측정된 LVDT 한 구간에 대해 다음 식 (5)를 사용하여 산정하였다.

$$\phi = \frac{\Delta T - \Delta C}{D_i h} \quad (5)$$

여기서,  $\Delta T$ 는 인장측 변위,  $\Delta C$ 는 압축측 변위,  $D_i$ 는 인장측과 압축측 계측 위치 사이의 거리이며  $h$ 는 계측구간의 길이이다.

각 구간에서 산정한 곡률은 다음 식 (6)을 통해 회전각으로 계산하고 회전각을 식 (7)을 통해 처짐으로 변환하여 보의 처짐량을 산정하였다.

$$\theta_i = \theta_{i-1} + 0.5 \frac{L}{N} (\phi_{i-1} + \phi_i) \quad (6)$$

$$\delta_i = \delta_{i-1} + 0.5 \frac{L}{N} (\theta_{i-1} + \theta_i) \quad (7)$$

여기서,  $L$ 은 전체 측정구간의 거리,  $N$ 은 측정구간의 개수이며,  $\theta$ 와  $\delta$ 는 각각 회전각과 처짐량이다. 보와 기둥 사이에서 발생하는 개폐거동은 보 전체의 회전을 일으키는 요인이 되며 전체 변위의 일정부분을 차지하게 된다.

개폐거동은 보 상하부에서 기둥의 접합면까지의 변위를 측정하여 산정하였으며 다음 식 (8)을 통해 산정할 수 있다. 이 회전각에 보의 길이를 곱하여 보가 회전하는 양을 측정할 수 있다.

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{\Delta T_g - \Delta C_g}{H_g} \quad (8)$$

여기서,  $\theta_B$ 는 개폐거동에 의한 보 전체의 회전각,  $\Delta T_g$ 는 인장을 받는 부분의 개폐거리 측정값,  $\Delta C_g$ 는 압축을 받는 부분의 개폐거리 측정값이며  $H_g$ 는 개폐거리 측정에 사용된 LVDT 위치 사이의 거리이다.

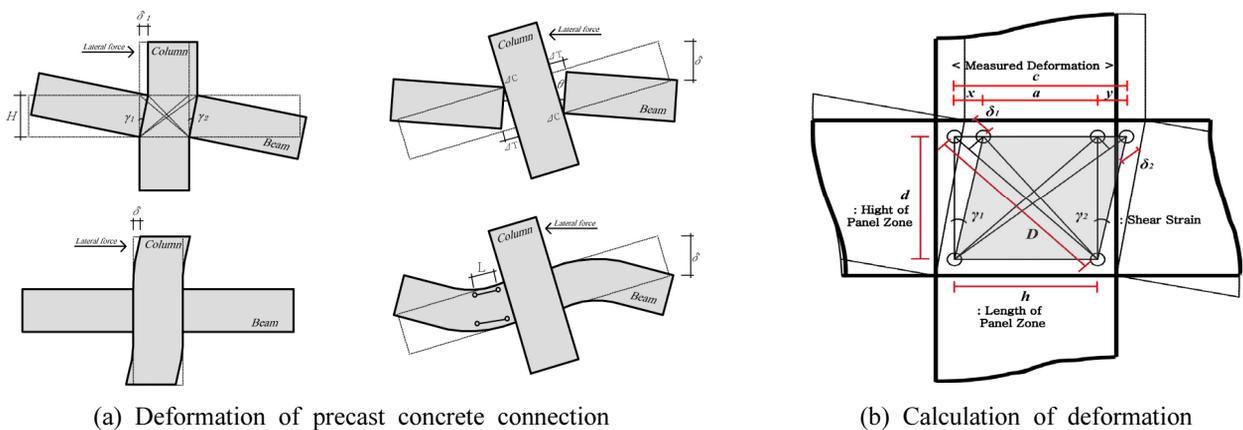


Fig. 2 Analysis of contribution deformation ratio

### 3. PC 보-기둥 접합부의 변형기여분 산정을 위한 실험

#### 3.1 실험개요

이 연구에서는 제안된 분류체계와 변형기여분 평가법에 대한 검토를 위해 총 4개의 PC 보-기둥 접합부를 선정하여 실험을 수행하였다.

현장타설 일체식 접합부를 표방하는 상세에 대해 평가하기 위해 일반 RC접합 상세인 MON 실험체를 계획하였으며, U형 Shell 단면의 PC 보를 사용하는 Half-PC 접합 상세로서 Kim 등<sup>15)</sup>에 의해 개발된 HFPC 실험체를 계획하였다. 이 Half-PC 접합부는 U형 PC셀과 현장타설 콘크리트부가 스티럽으로 연결되는 방식으로 PC셀과 core-beam 사이의 미끄러짐을 최소화하였으며, 기둥을 관통시키는 보 철근을 사용하여 접합부의 일체화를 도모한 상세이다. 세 번째 STR 실험체는 Choi<sup>1)</sup> 등에 의해 개발된 PC접합

상세를 바탕으로 제작하였으며, 철골연결재와 강섬유 보강 콘크리트가 적용되었다. 이 접합상세는 보 부재의 휨 항복에 의한 소성힌지를 기둥으로부터 일정구간 이격시켜 발생되도록 설계되었으며, 최종과괴시점까지 접합부영역은 탄성 상태 내에서 거동한다. 네 번째 HBRD 실험체는 NIST에서 주관한 PRESSS 프로그램에 의해 개발 검증된 hybrid connection의 접합상세를 적용하였으며, 비부착 텐던의 탄성거동에 의한 복원력과 mild steel에 의한 에너지 소산을 이용한 상세이다.

모든 실험체의 기둥은 350 mm × 350 mm, 보는 350 mm × 400 mm의 단면크기로 설계되었다. MON 실험체의 일체타설 콘크리트와 PC보-기둥 부재 콘크리트의 설계압축강도는 40 MPa이며, 철근 및 연결철물은 SD400강도를 사용하였다. ACI 318-11<sup>16)</sup>과 KCI 2012<sup>17)</sup>의 내진설계를 위한 특별 고려사항에서는 특수모멘트골조에 대한 강기둥-약보 개념의 거동을 유도하기 보-기둥 접합부의 상·하 기둥 휨강도의 합이 좌·우 양 보의 휨강도의 합 보다 1.2 배 이상이 되도록 하고 있다. 따라서 모든 실험체의 휨강도비는 이를 상회하도록 설계되었다.

KBC 2009에서는 특수모멘트골조 휨 부재의 축 방향 철근에 대해 휨강도를 제한하고 있으며, 접합면에서 정모멘트에 대한 강도는 부모멘트에 대한 강도의 1/2 이상이 되도록 요구하고 있다. 이에 따라 HFPC 실험체의 관통철근을 2-D22로 결정하여 충분한 휨강도를 발휘하도록 했다.<sup>15)</sup>

STR 실험체는 기존의 연구 결과에 따른 상세를 적용하였으며, PC 기둥에 삽입된 강관은 □-200 × 200 × 12, 보에 삽입되는 강관은 PL-334 × 690 × 12를 각각 적용하였으며, 접합부와 보 일부에 타설되는 강섬유 보강콘크리트의 범위는 접합면으로부터 0.7d(250 mm)까지로 결정하였다. 또한 강섬유 보강콘크리트의 설계압축강도는 100 MPa를 적용하였다.<sup>1)</sup>

HBRD 실험체의 비부착 텐던에 대한 jacking force는  $0.22f_{pu}$ 를 적용함으로써 ACI에서 권고하는  $0.4f_{pu}$  이내의 값을 만족하도록 하였다. 또한 설계항복강도 300 MPa의

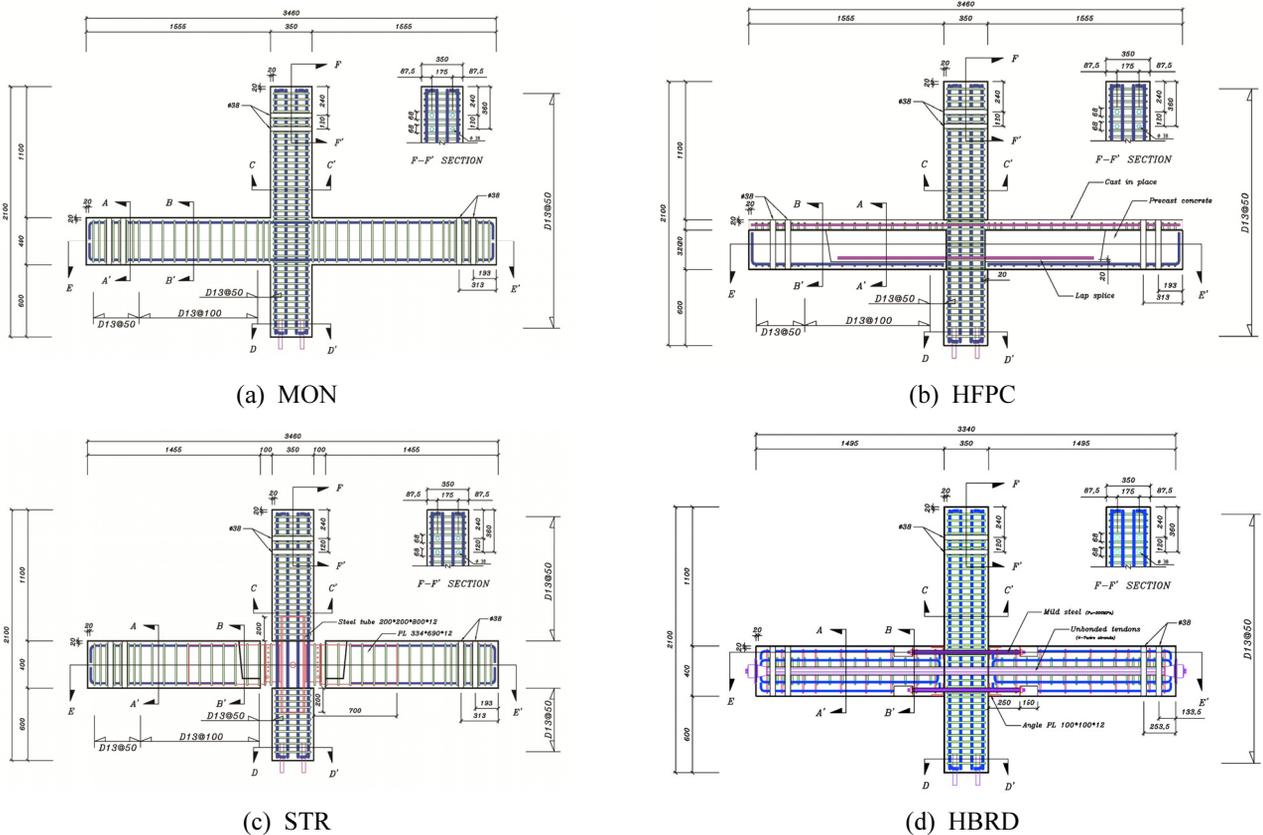


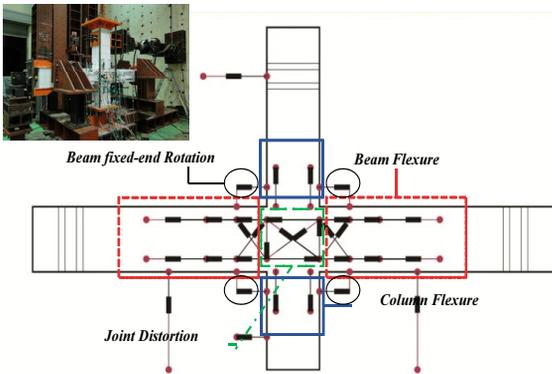
Fig. 3 Specimen details

**Table 2** Specimen properties

ID	Connection method	Column size (mm)	Beam size (mm)	Hoop bar of Joint region	Column						
					Reinforcing bar			Hoop			
					$n_c$	$f_{cy}$ (MPa)	$\rho_c$	$n_h$	$f_{hy}$ (MPa)	$\rho_h$	$s_h$ (mm)
MON	Cast-in-place	350×350	350×400	○	12-D22	508	0.038	D13	475	0.011	50
HFPC	Wet connection (using through bar)	350×350	350×400	○	12-D22	508	0.038	D13	475	0.011	50
STR	Wet connection (using steel tube & plate)	350×350	350×400	×	12-D22	508	0.038	-	-	-	-
HBRD	Dry connection (using unbonded PT strands, mild steel)	350×350	350×400	○	12-D22	508	0.038	D13	475	0.011	50

ID	Beam							$f'_c$ (MPa)		Axial load ratio	$V_n$ (kN)	$\phi V_n$ (kN)	$V_u$ (kN)
	Reinforcing bar			Stirrup				PC member	Joint				
	$n_b$	$f_{by}$ (MPa)	$\rho_{bu} + \rho_{bl}$	$n_s$	$f_{sy}$ (MPa)	$\rho_s$	$s_b$ (mm)						
MON	8-D16	437	0.012	D13	475	0.014	100	40.5		0.1	970	824	720
HFPC	8-D16	437	0.012	D13	475	0.014	100	40.5	40	0.1	854	726	711
STR	8-D16	437	0.012	D13	475	0.014	100	40.5	95.7	0.1	1492	1268	720
HBRD	12-D16	437	0.018	D13	475	0.014	100	40.5	-	0.1	970	824	720

$f_{cy}, f_{hy}, f_{by}, f_{sy}$  : yield strength column bar, hoop, beam bar, beam stirrup respectively.  $\rho_c, \rho_h, \rho_{bu}, \rho_{bl}, \rho_s$  : ratio of column bar, hoop, upper beam bar and lower beam bar, stirrup respectively.  $n_c, n_h, n_b, n_s$  : size of column bar, hoop, beam bar, stirrup respectively.  $f'_c$  : compressive strength of concrete or steel fiber reinforced concrete.  $V_n$  : type 2 shear strength of joint predicted by ACI  $V_u$  : design shear force in joint



**Fig. 4** Measured of global and local behavior

mild steel을 이용하여 원활한 에너지 소산이 발생하도록 계획하였다. 각 실험체의 상세는 Fig. 3에 나타내었다. 이 연구에서는 실험체의 접합부 전단내력을 식 (9)와 같은 ACI 352R-02의 전단강도 산정식을 이용하여 계산하였다.

$$V_n = 0.083\gamma\sqrt{f'_c}b_jh_c \quad (9)$$

여기서,  $V_n$ 는 접합부 전단강도,  $\gamma$ 는 접합된 보 부재수에 따른 구속효과 및 접합종류, 그리고 지반의 지진위험도에 따른 계수(Type2 에서 2면 구속된 내부접합부=15),  $f'_c$ 는 콘크리트 압축강도,  $b_j$ 는 접합부의 폭,  $h_c$ 는 접합부의

깊이이다. 실험체 제원을 Table 2에 정리하였으며, 실험체상세는 Fig. 3에 나타내었다. 실험방법은 현행 ACI 374 위원회에서 제안하고 있는 실험 방법을 사용하였으며, 이 연구에서 제안하고자 하는 각 상세별 표준화된 성능평가를 위해 변형기여분 측정을 위해 제안된 측정방법을 적용하였다(Fig. 2참조). Fig. 4와 같이 총 36개의 변위계를 통해 기둥과 보 단부 수직변위 및 회전량과 접합부 패널존에서의 전단변위 등을 측정하여 각 요소별 변형량을 분석할 수 있도록 구성하였다.

#### 4. 실험 결과

일체 타설된 RC실험체의 경우 변위각 3.5%에서 최대 강도에 도달하였음, 4.25%까지 안정적인 이력거동 양상을 보였다. 이후 접합면에서의 내력감소로 최종 파괴 되었다. 다소 완만한 이력곡선 형태를 보이며, 전형적인 연성거동에 의한 점진적 강도변화가 나타났다.

HFPC 실험체는 변위각 2.2%에서 최대강도를 나타내었으며 변위각 7%까지 강도저하가 일정하게 나타나는 양상을 보였다. 접합부 및 현장타설부분에서 균열이 발생하면서 핀칭 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 PC부재와 현장타설된 콘크리트의 강도 차이와 주철근의 부착면적 차이 등의 이유로 불연속된 타설계면에

**Table 3** Test results

Specimen	Loading direction	$P_y$	$P_{max}$	$P_f$	$\Delta_y$	$\Delta_f$	$\mu$
		(kN)	(kN)	(kN)	(%)	(%)	
MON	Pos.(+)	110	120	114	1.5	4.25	2.83
	Neg(-)	110	127	120	1.7	4.25	2.5
HFPC	Pos.(+)	140	156	135	1.25	7.0	5.6
	Neg(-)	139	158	130	1.25	8.0	6.4
STR	Pos.(+)	168	192	170	1.75	5.0	2.86
	Neg(-)	176	200	178	1.75	5.0	2.86
HBRD	Pos.(+)	95.3	110	91.5	3.0	6.0	2.0
	Neg(-)	100	117	86.6	3.25	6.0	1.85

$P_y$ : yield load,  $P_{max}$ : peak load,  $P_f$ : failure load  $\Delta_y$ : yield displacement  $\Delta_f$ : failure displacement,  $\mu$ : ductility( $\Delta_f/\Delta_y$ )

서 주철근의 미끄러짐이 많이 발생하였기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.

강한접합부의 대표상세인 STR 실험체는 변위각 3.5%에서 최대강도를 나타냈으며, 변위각 5%까지 연성거동을 보이다가 보 소성힌지 발생 이후 점진적인 내력을 상실을 보이며 최종파괴 되었다. 변위각 5%에서 보 소성힌지 발생에 의한 콘크리트 탈락으로 최종파괴에 이르렀다. 재하단계 초기에서 높은 강성을 보이며, 이는 철골연결재 및 ECC타설에 의한 것으로 판단된다. 또한, 소성힌지를 유도하기 위해 결정된 접합 상세 길이의 끝단에서 소성힌지가 효과적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

HBRD 실험체는 부재각 4.0%에서 최대강도를 나타냈으며, 부재각 6.0%에서 최종파괴 되었다. 초기 및 파괴 시 비교적 낮은 강성을 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 최대하중의 발현까지 이력곡선의 넓이가 원점 근처에서 넓어지는 에너지 소산형태의 거동은 크게 나타나지 않았다. 반면, self-centering에 의한 flag shape의 이력거동 양상을 나타내었다. 각 대표상세들 중 최종 파괴에 이를 때까지 가장 큰 변형 능력을 나타내는 것을 확인할 수는 있었으나 self-centering에 의해 에너지 소산능력의 큰 증가는 없는 것으로 나타났다. 실험 결과는 Table 3과 같다.

### 5. 각 상세별 변형기여분

하중-변위 이력 및 파괴양상등과 같은 실험값은 각 상세들이 갖고 있는 특징을 정량적으로 평가하기에는 다소 무리가 있다. 이를 위해 이 연구에서는 부재의 각 요소들이 갖고 있는 변형능력의 분산정도를 분석하여 표준화된 평가방법을 제안하였다.

Fig. 5 및 6과 같이 현장 타설 일체식 접합부의 경우 접합부에서의 전단 파괴와 보에서의 휨 파괴가 동시에 나타났다. 또한 접합계면에서 일부 개폐거동이 관찰되었으며 발생가능한 모든 변형이 고르게 분포하였다. 최대강도를 발현하는 지점에서의 변형기여분의 분포는 접합부 20%, 기둥 24%로 나타났으며, 보의 회전에 의한 변형

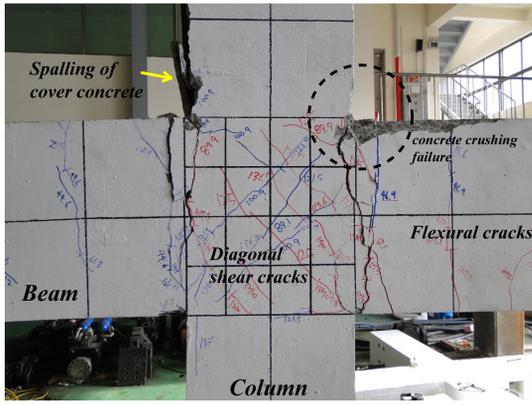
기여분은 33%, 보의 휨 변형에 의한 변형기여분은 23%으로 고르게 나타났다. 변형기여분이 전체적으로 고르게 나타나는 바, 전체 요소에서 큰 비탄성 변형을 기대할 수 있는 것으로 확인되었다.

일체식 접합부 중 연성접합부로 분류되는 HFPC의 경우 파괴양상에서 나타나는 바와 같이 타설 계면에서 파괴가 집중되며 이에 연관된 접합부다. 변형기여분은 접합부에 의한 변형기여분이 33%, 기둥의 변형에 의한 변형기여분이 1.7%, 보의 회전에 의한 변형은 46% 그리고 보의 휨변형은 19.3%로 나타났다. 즉, 현재 국내에서 빈번히 사용중인 half-PC의 경우 현장 타설부와 PC 부재사이의 계면에서 파괴가 집중되는 바, 해당 구간에서의 큰 변형능력이 확보되도록 해야 할 것으로 판단된다. 특히, 기둥의 휨 변형이 적게 나타나는 것으로 보아, 보 및 접합부에서 변형이 집중되는 것을 확인할 수 있어, 보가 큰 연성을 확보하도록 하는 설계가 중요한 것으로 판단된다.

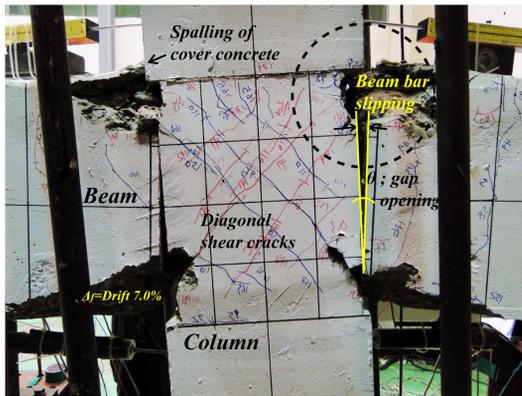
강한접합부를 대변하는 STR 접합부의 경우 접합부에서 초기 균열 외에 여타 균열이 관찰되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 반면 전체 구성 요소를 확인한 결과 접합부에서 보 쪽으로 돌출된 연결 철물이 끝나는 지점에서 파괴가 집중되어 소성힌지가 발생했음을 확인할 수 있었다.

변형기여분의 평가 결과 파괴양상에서 나타난 바와 같이 접합부에서 변형기여분을 크게 가지지 못하고 보의 휨 변형에서 큰 파괴가 집중되었음을 확인할 수 있었다. 접합부의 변형기여분은 약 1%가 측정되었으며, 기둥의 변형기여분은 6%, 보의 회전에 의한 변형기여분은 2%, 보의 휨변형에 의한 변형기여분은 91%로 소성힌지에 변형이 성공적으로 집중된 것을 확인할 수 있었다. 이 경우 계면에서 길이 방향으로의 변형은 어느 정도 있었으나, 변형기여분에 포함할 정도는 나타나지 않았다.

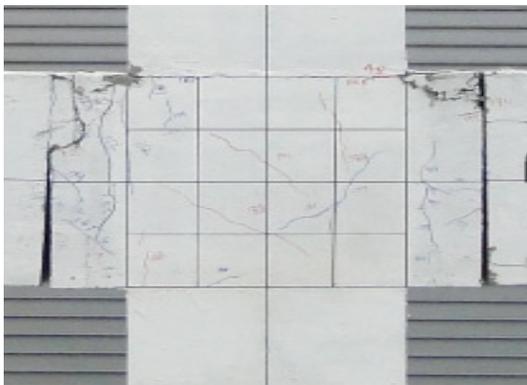
연결식 접합부의 대표 상세인 HBRD 실험체의 경우 여타 실험체에 비해 큰 변형 능력을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 파괴 형태는 연성접합부와는 달리 접합부에 균열이 크게 발생하지 않고 보와 접합부 계면에서의 개폐 형태로 파괴가 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 또



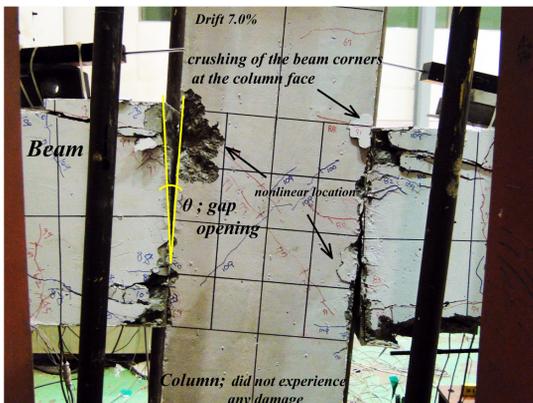
(a) MON



(b) HFPC

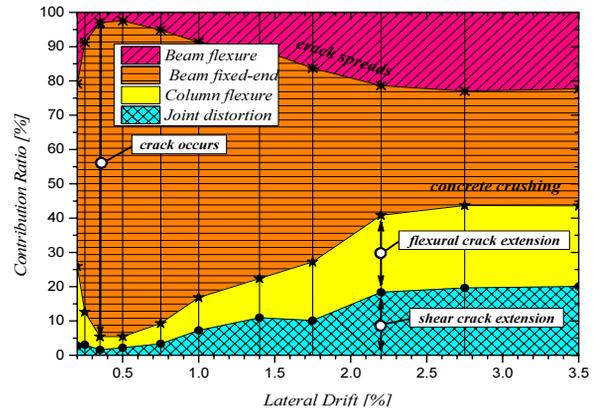


(c) STR

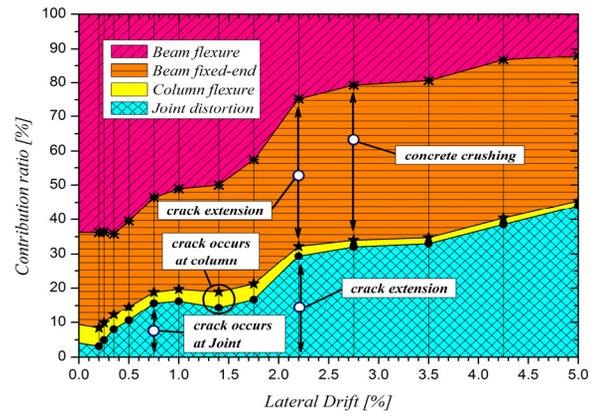


(d) HBRD

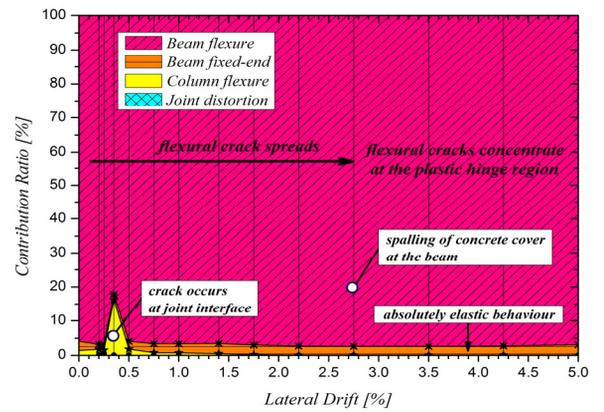
Fig. 5 Failure mode



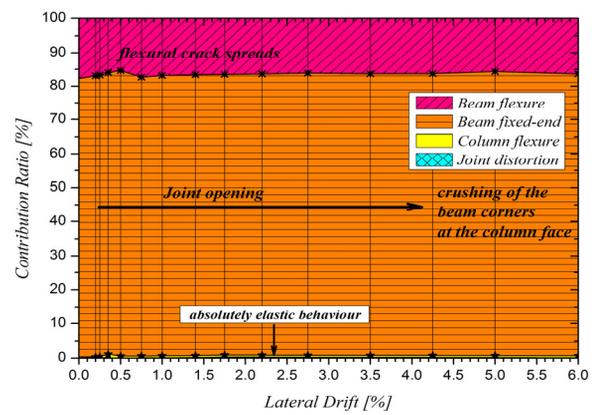
(a) MON



(b) HFPC



(c) STR



(d) HBRD

Fig. 6 Contribution of deformation components

**Table 4.** Contribution of deformation components by tested

Classification by characteristic of connection behavior	Classification by characteristic of connection details	Performance index					
		Joint		Connection		Components	
		Joint shear distortion (%)	Joint strength	Rigid rotation (%)	Bar stress	Beam flexure deflection (%)	Column flexure deflection (%)
		Local behavior	Local Strength	Local behavior	Yield strength	Local behavior	
Equivalent monolithic system	Strong connection	Less than 5%	$V_c + V_s$	Less than 5%	$f_y \sim$	Larger than 90%	Less than 10%
	Ductile connection	5% to 95%	$V_c$	Less than 10%	$f_y \sim$	Less than 20%	Less than 5%
Jointed system	Limited ductility	-	-	-	-	-	-
	Hybrid	Less than 5%	$V_c + V_s + V_{ps}$	Larger than 80%		Less than 20%	Less than 5%
	Rocking	-	-	-	-	-	-

한 접합면에서 보의 상하부 압축단에서 파괴가 집중되는 것을 확인할 수 있었으며, 강한접합부와 같이 보의 휨변형을 유발하는 소성힌지의 형성 위치가 보와 기둥의 계면에서 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 HBRD 접합부에서의 변형기여분은 접합부의 변형에 의해 0.2%, 기둥의 변형에 의해 0.5%가 유발되었으며 보의 회전 변형에 의해 83%, 보의 휨 변형에 의해 16.3%가 발생한 것으로 나타났다.

실험 결과 현장 타설형 RC 접합부의 경우 각 변형 기여분이 10% 이하의 차이를 보이고 있으며, 연성접합부는 유사한 형태로 나타나지만 기둥의 변형이 급격히 감소한 형태임을 확인할 수 있었다. 강한접합부의 경우 보의 휨 변형이 전체 변형기여분의 대부분을 차지하며, 연결식 접합부의 경우에는 개폐거동에 의한 변형이 가장 크게 나타났으며, 이를 토대로 Table 4에 각 상세별 변형성분을 정의 하였다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 향후 PC 접합부에 대한 독립적 설계기준 마련을 위해 PC 접합부의 분류 방안을 제시하였다. 이러한 분류는 변형기여분을 평가함으로써 가능한 것을 확인하였다. 변형기여분은 접합부의 변형, 보의 회전 변형, 보의 휨변형 및 기둥의 휨 변형으로 구성하였으며, 측정 및 계산 방법을 제안하였다. 변형기여분의 측정 방법을 사용하여 적용 가능한, 제안된 분류체계에서는 일체식 접합부의 연성접합부와 강한 접합부, 그리고 연결식 접합부로 구성하였다.

연성접합부는 변형기여분의 각 요소들이 비교적 고르게 분포하나 기둥의 변형이 나타나지 않으며 접합부의 변형이 크게 나타남에 따라 현장타설 부분의 일체성 고

려가 중요한 것으로 판단되었다. 또한 연성접합부의 경우 접합부를 지나는 주근의 항복 여부에 따라 변형기여분의 형태가 크게 변하는 것으로 나타나므로 설계 시, 접합부가 보유하고 있는 변형능력에 대한 고려가 별도로 필요할 것으로 판단된다.

강한 접합부는 보의 휨 변형기여분이 높은 접합상세로써, 이는 접합부의 최종파괴가 보에서 일어날 수밖에 없음을 의미한다. 따라서 강한 접합부의 범주에 속하는 접합상세의 설계는 종래의 복잡하고 어려운 설계절차를 간편화할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 접합부의 높은 강도에 대해서는 경제성 여부에 맞추어 설계자가 별도의 판단을 해야 할 필요가 있다.

연결식 접합부는 접합면에서의 개폐거동에 의한 변형이 지배요소로 작용하므로 설계 시, 부재 간 연결장치가 보유하고 있는 에너지 소산능력에 대한 성능 검증이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원과 한국연구재단(No. 2013R1A1A2010717) 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다.

## References

- Choi, H. K., Choi, Y. C., and Choi, C. S., "Development and Testing of Precast Concrete Beam-to-Column Connections," *Journal of Engineering Structures*, Vol. 53, No. 11, 2013, pp. 1820-1835. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.021>)
- Seo, S. Y., Lee, L. H., Jin, S. O., and Choi, Y. C., "Evaluation on the Deformation Capacity of RC Frame

- Structure with Strong Column-Weak Beam,” *Journal of KSMI*, Vol. 7, No. 26, 2003, pp. 225-233.
3. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings,” A Wiley Interscience Publication, 1992, pp. 250-269.
  4. Federal Emergency Management Agency, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, 1994 Edition, FEMA Publication No. 222; and Commentary, FEMA Publication No. 223, 1995, pp. 183-195.
  5. Federal Emergency Management Agency, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, 1997 Edition, FEMA Publication No. 302 and Commentary, FEMA Publication No. 303, 1998, pp. 179-197.
  6. ACI Committee 374, “Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads (ACI 374.2R-13),” *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich, 2013, pp.1-18.
  7. NZS 3101, “The Design of Concrete Structures,” Part 1 and Part 2, New Zealand Standard, 2006, pp. 18.1-18.9.
  8. Fib Task Group 7.3, “Seismic Design of Precast Concrete Building Structures,” *Fib Bulletin 27*, 2003, pp. 64-128.
  9. Nakaki, S. D., Stanton, J. F., and Sriharan, S., “An Overview of the PRESSS Five-Story Precast Test Building,” *Journal of PCI*, Vol. 44, No. 2, 1999, pp. 26-39.
  10. Priestley, M. J. N., “Overview of PRESSS Research Program,” *PCI Journal*, Vol. 36, No. 4, 1991, pp. 50-57.
  11. ACI-ASCE Committee 352, “Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352R-02),” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2002, pp. 1-37.
  12. Englekirk, R. E., “Development and Testing of a Ductile Connector for Assembling Precast Concrete Beams and Columns,” *Journal of PCI*, March-April 1995, pp. 36-51.
  13. Cheok, G. and Lew, H. S., “Performance of 1/3-Scale Model Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads-Report No. 2,” NISTIR 4589, NIST, June 1991, pp. 1-40.
  14. Cheok, G. and Stone, W., “Performance of 1/3-Scale Model Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads-Report No. 3,” NISTIR 5246, NIST, August 1993, pp. 1-43.
  15. Kim, S. H., Moon, J. H., and Lee, L. H., “An Experimental Study of the Structural Behavior on the Precast Concrete Beam-Column Interior Joint with Splice Type Reinforcing Bars,” *Journal of AIK*, Vol. 20, No. 10, 2004, pp. 53-61.
  16. ACI 318M-11. Building Code Requirements for Structural Concrete And commentary, Michigan(USA): American Concrete Institute(ACI), Committee 318, Vol. 318, 2011, pp. 299-334.

**요약** 이 연구는 PC 보-기둥 접합부의 일반적인 거동의 접합 상세에 따른 통합적 평가 방안을 제안하였다. 이 연구는 접합부의 파괴 패턴과 이에 연관된 접합부 상세의 특징을 정량적으로 표현하기 위해 접합부와 각 요소들이 보유한 변형기여분을 사용할 것을 제안하였다. 이에 따라 PC 접합부는 ‘일체식 접합부’와 ‘연결식 접합부’로 크게 분류되었다. 접합부의 분류를 위한 기준 사항의 제안 및 검증에 위해 네 개의 보-기둥 실험체의 실험을 수행하였다. 실험은 일반적인 보-기둥 접합부의 실험 방법과 같은 방법으로 진행되었다. 가력은 접합부 상부 기둥의 끝단에서 수행되었으며, 보 양단은 힌지로 고정되었다. 변형기여분의 평가를 위해 총 34개의 LVDT가 주요 변형이 발생할 것으로 예상되는 곳에 설치되었다. 실험 결과 세 개의 실험체에서 나타난 각 요소들의 변형기여분은 수치적으로 다른 특성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 기반으로 접합부의 변형 정도와 다른 요소들의 변형 정도에 의거하여, 접합부의 변형이 적고 보의 휨 변형이 크게 나타나는 강한 접합부와 접합부의 변형이 용인되는 연성 접합부로 일체식 접합부를 분류할 수 있었다.

**핵심용어** : 프리캐스트 콘크리트, 보-기둥 접합부, 변형기여분, 분류체계, 성능평가