



## 프리캐스트 와이드거더-기둥 접합부의 횡방향 구조거동

장범수<sup>1)</sup> · 김재현<sup>1)</sup> · 최승호<sup>2)</sup> · 김강수<sup>3)</sup> · 황진하<sup>4)</sup> · 최석동<sup>5)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울시립대학교 건축공학과 대학원생 <sup>2)</sup>서울시립대학교 건축공학과 박사후 연구원

<sup>3)</sup>서울시립대학교 건축학부 스마트시티융합전공 교수 <sup>4)</sup>한국건설생활환경시험연구원 전남제주지원 선임연구원

<sup>5)</sup>(주)연우건축구조기술사사무소 대표이사

## Structural Behavior of Precast Wide Girder-Column Joints under Lateral Cyclic Loading

Beom Soo Jang,<sup>1)</sup> Jae Hyun Kim,<sup>1)</sup> Seung-Ho Choi,<sup>2)</sup> Kang Su Kim,<sup>3)</sup>  
 Jin-Ha Hwang,<sup>4)</sup> and Suk Dong Choi<sup>5)\*</sup>

<sup>1)</sup>Graduate Student, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 02054, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Postdoctoral Research Fellow, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 02054, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Professor, Department of Architectural Engineering and the Smart City Interdisciplinary Major Program, University of Seoul, Seoul 02054, Rep. of Korea

<sup>4)</sup>Researcher, Jeonnam and Jeju Branch, Korea Conformity Laboratories, Yeosu 59631, Rep. of Korea

<sup>5)</sup>Chief Executive Officer, Yunwoo Structure Engineering, LTD, Seoul 05836, Rep. of Korea

**ABSTRACT** In this study, precast concrete (PC) wide girders were developed to secure economic efficiency by reducing the amount of slab volume resulting from enabling to shorten the span length of slab. A total of three PC wide girder-column joint specimens were fabricated with different details of reinforcing bars penetrating beams and columns in the joint region. Reversed cyclic loading tests were then conducted to evaluate structural performance, from which the lateral behavior of all the specimens were compared in detail. In addition, seismic performance of the proposed PC wide girder-column joints was quantitatively evaluated based on the acceptance criteria of the ACI 374 report.

**Keywords :** wide girder, precast concrete, beam-column joint, panel zone, seismic performance

### 1. 서 론

국내 물류센터의 골조 공사비는 전체 공사비의 50% 이상을 차지하고 있으며, 이에 따라 물류센터의 골조 공사비를 절감할 수 있는 다양한 종류의 구조공법이 개발·적용되고 있다. 특히, 프리캐스트 콘크리트(precast concrete, 이하 PC) 공법을 이용하여 슬래브 제작에 투입되는 재료 물량을 절감하기 위한 노력이 지속적으로 이루어졌으나, 현재까지 개발된 PC 슬래브는 개념 및 형태가 매우 유사하며, 동일 공간에 적용할 경우 PC 슬래브 간의 물량차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이에 따라 최근에는 보의 폭을 증가시켜 PC 슬래브의 경간 및 단면을 감소시킴으로써 경제성을 높일 수 있는

와이드거더 공법이 주목을 받고 있다. 와이드거더 공법은 일방향 PC 슬래브를 지지하는 보 부재의 폭을 넓혀 제작함으로써 PC 슬래브의 경간을 감소시킬 뿐만 아니라, 층고절감을 실현하면서도 보 부재의 휨 및 전단 강도를 확보할 수 있다. 다만, 와이드거더 공법은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 기둥의 폭에 비해 보의 너비가 크에 따라 보의 길이방향 주철근 중 일부가 기둥 단면 외부에 정착하게 된다. 이와 같은 상재는 접합부 영역에서의 내진성능을 저하시킬 수 있으며, 뉴질랜드(NZS 1170.5, NZS 3101) 기준에서는 와이드거더를 제한적으로 적용할 것을 권고하고 있다.

와이드거더 공법의 적용 확대를 위하여 와이드거더-기둥 접합부의 내진성능에 관한 다양한 실험적, 해석적 연구가 수행되었다. Gentry and Wight(1994)는 보의 배근 상재를 변수로 철근콘크리트(reinforced concrete, 이하 RC) 와이드거더-기둥 접합부 실험을 수행하였으며, Quintero-Febres and Wight(2001)는 와이드거더와 기둥 폭의 비를 주요 변수로 실험적 연구를 수행하였다. Fadwa et al.(2014)과 Elsouri and Harajili

\*Corresponding author E-mail : csd@yunwoo.co.kr

Received October 20, 2020, Revised December 04, 2020,

Accepted December 08, 2020

©2021 by Korea Concrete Institute

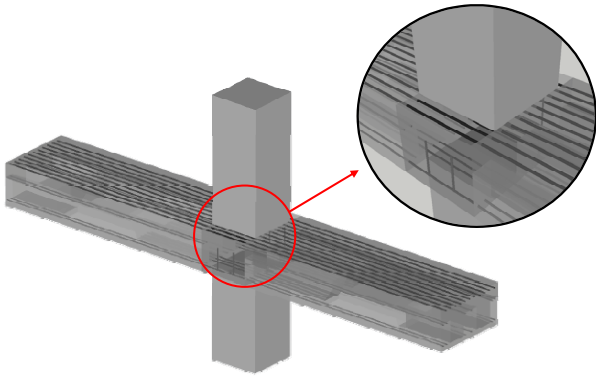


Fig. 1 3D modeling of wide girder

(2015)는 RC 와이드거더-기둥 접합부의 반복가력실험을 수행하고, 이를 일반적인 RC 보-기둥 접합부와 비교·분석함으로써 RC 와이드거더-기둥 접합부의 내진성능을 정량적으로 평가하였다. Behnam et al.(2018)은 ABAQUS를 활용하여 RC 와이드거더-기둥 접합부의 거동을 모사할 수 있는 유한요소 모델을 개발하였으며, 이를 통해 보와 기둥의 형상비, 보의 철근량 등에 대한 변수 분석을 수행하였다. 이외에도 Benavent-Climent(2007), Siah et al.(2003), Li(2010), Mirzabagheri et al.(2015) 등 다양한 연구자들에 의해 RC 와이드거더의 구조 성능에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 이처럼 RC 와이드거더-기둥 접합부의 내진성능에 대한 연구는 상당수 진행되었음에도 불구하고, PC 와이드거더-기둥 접합부에 관한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 현행 구조기준(ACI 318-19)에서는 특수한 형태를 가지는 보-기둥 접합부의 내진성능을 검증하기 위해서는 충분한 실험적, 해석적 연구가 수행되어야 할 것을 명시하고 있다. 따라서 이 연구에서는 1/2 스케일의 PC 와이드거더-기둥 접합부를 제작하고 횡하중에 대한 반복가력실험을 통해 PC 와이드거더-기둥 접합부의 횡방향 구조거동을 분석하고, ACI 374 report(2005)에 제시된 성능 조건(acceptance criteria)을 통하여 접합부의 내진성능을 평가하였다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 실험변수

일반적으로 PC 시스템에서는 접합부 성능을 확보하기 위하여 포스트텐서닝 공법, 현장 철근 배치(부분 습식 공법), 기계식 접합 또는 용접접합 방법 등을 사용한다. 이 연구에서는 와이드거더-기둥 접합부의 일체성을 확보함과 동시에 시공성이 우수한 접합부 상세를 도출하기 위하여 보와 기둥을 관통하는 길이방향 철근의 정착상세를 변수로 한 총 3개의 와이드거더-기둥 접합부 실험체를 제작하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 ALT1 실험체는 PC 보 단부에서 연장된 D13 철근 2개가 갈고리 형태로 기둥 내부에 정착되도록 배근하였다. 또한, 보-기둥 조립 과정에서 일자형 D13 철근 6개를 추가로 배근하였다. ALT2 실험체는 접합부 영역의 복잡한

Table 1 Experiment variables

Specimen	Variable	Figure
ALT1	6-D13 straight rebars 2-D13 hooked rebar at the joint inside	
ALT2	8-D13 straight rebars	
ALT3	6-D13 straight rebars 2-D13 hooked rebar at the joint outside	

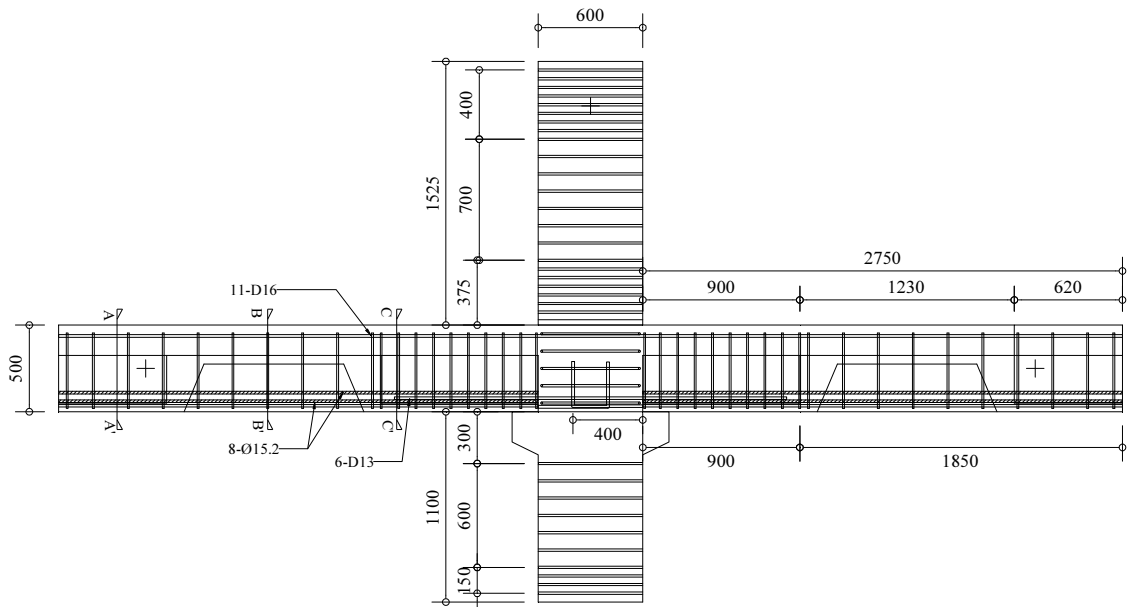
상세를 간소화하고 시공성을 높이기 위하여 PC 보 단부에 별도의 철근을 연장하지 않고, 보-기둥 조립 과정에서 일자형 D13 철근 8개를 배근하였다. ALT3 실험체는 PC 보 단부에서 연장된 D13 철근 2개를 갈고리 형태로 기둥 외부에 정착시켰으며, 일자형 D13 철근 6개를 추가로 배근하였다.

### 2.2 실험체 설계

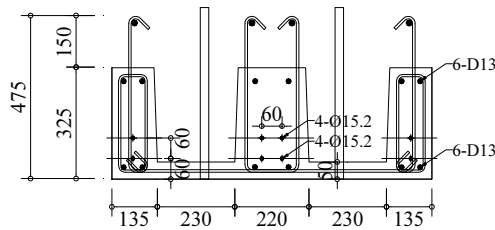
이 연구에서는 물류센터를 프로토타입(prototype)으로 설정하고 ACI 318-19(ACI committee 318 2019)에 근거하여 부재들을 설계하였다. 프로토타입 구조물의 층고와 경간은

각각 10 m와 11 m이다. 실험체는 실험과정에서의 양중 및 세팅의 제한 조건으로 인해 높이 3,125 mm, 경간 5,500 mm로 제작되었다. 모든 실험체에서 PC 보 단면의 크기는 950 mm×500 mm, PC 기둥 단면의 크기는 600 mm×600 mm로 제작되었다. Fig. 2는 실험체의 단면과 입면 및 배근상세를 나타낸 것이며, Table 2는 실험체 제작에 사용된 재료들의 시험결과를 나타낸 것이다. PC 보의 단면은 구조물량 절감을 위해 단부는 W형, 경간부는 M형으로 계획되었다. 단위 PC보 제작 시 직경 15.2 mm의 강연선 8개를 배치한 후 강연선 극한강도의 약 0.6배에 해당하는 프리텐션을 도입하였으며, 상부와 하부에 각각 6개의 D13 철근이 단위 PC보의 전 길이에 걸쳐 연속되도록 배근하였다. 또한, D10 폐쇄형 띠철근을 실험체의 외단으로부터 1,850 mm 구간에 200 mm 간격, 나머지 900 mm 구간에는 100 mm 간격으로 배근하였다.

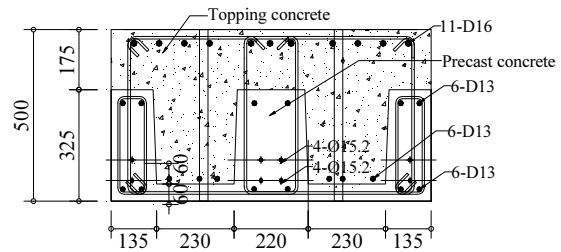
PC 상부 기둥의 길이는 1,525 mm, 하부 기둥의 길이는 코벨부를 포함하여 1,100 mm로 제작하였으며, 단면 내에는 상·하부 기둥 모두 동일하게 16개의 D22 길이방향 철근을 배근하였다. 상·하부 PC 기둥 조립 시 무수축 물탈을 충전하기 위하여 상부 기둥의 모든 주근에 스플라이스 슬리브



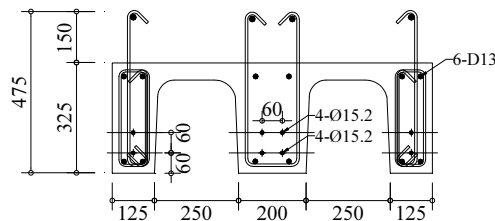
(a) Elevation drawing of wide-beam column specimen



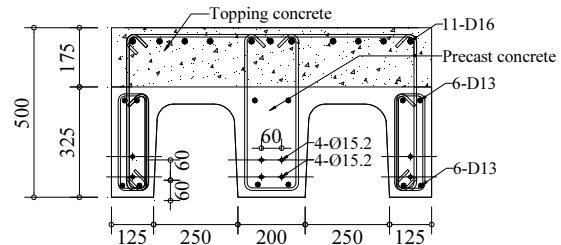
(b) Section A-A' before casting topping concrete



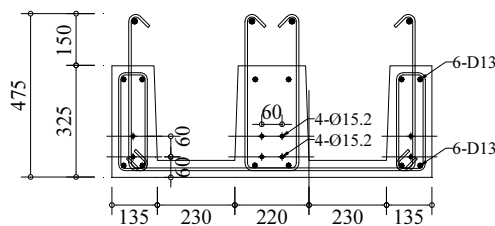
(c) Section A-A' after casting topping concrete



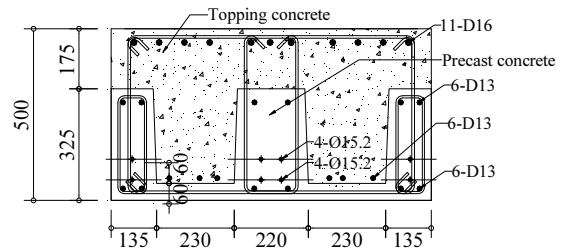
(d) Section B-B' before casting topping concrete



(e) Section B-B' after casting topping concrete



(f) Section C-C' before casting topping concrete



(g) Section C-C' after casting topping concrete

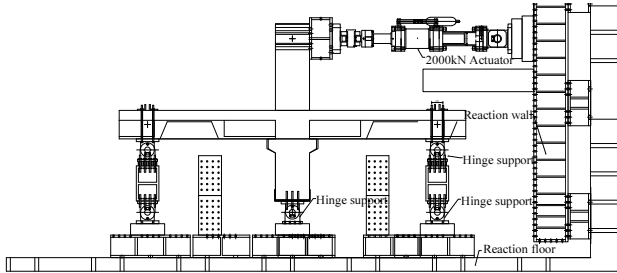
Fig. 2 Details of specimens (unit: mm)

(splice sleeve)를 장착하였다. 상부 기둥은 D13 폐쇄형 띠철근을 최상단으로부터 400 mm 구간과 최하단으로부터 375 mm 구간에는 50 mm 간격, 그 외의 구간에는 100 mm 간격으로 배근하였으며, 하부 기둥은 최하단으로부터 1,500 mm 구간에는 50 mm 간격, 나머지 구간은 100 mm 간격으로 배근하였다.

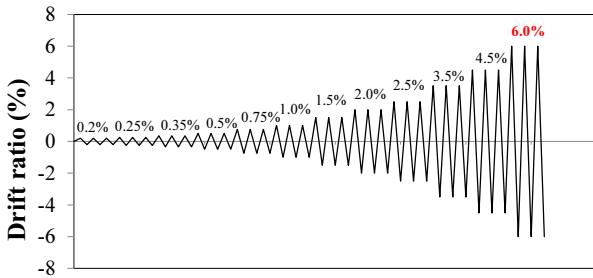
PC 보와 PC 기둥 부재의 제작을 완료한 후, 단위 PC 보 부재를 하부 기둥의 코벨부에 양측으로 위치시키고 상부 기둥을 하부 기둥과 연결하여 조립을 진행하였다. 토퍼 콘크리트를 타설하기 이전에, 보 W형 단면의 골 위치에 해당되는 중공부에 보와 기둥을 관통하는 D13 하부 철근 6개를 배치하였다. 다만, ALT2 실험체는 해당 위치에 D13 하부 철근 8개를

**Table 2** Material properties (unit: MPa)

Material	Compressive strength	Yield strength	Tensile strength
Topping concrete	23.4	-	-
Precast concrete	45.5	-	-
D10 rebar	-	459.0	597.0
D13 rebar	-	456.5	618.0
D16 rebar	-	448.0	591.4
φ 15.2 strand	-	1,784.5	1,952.4



(a) Front view of initial experiment setup



(b) Loading protocol

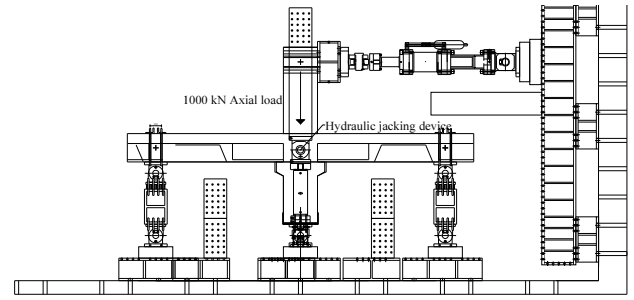
**Fig. 3** Initial experiment setup

배치하여 모든 실험체에서 보와 기둥을 관통하는 하부 철근의 단면적이 동일하도록 설계하였다. 또한, 보의 상부에 보와 기둥을 관통하는 D16 철근 11개를 배치하였으며, 이후 토핑 콘크리트를 타설하여 하부 PC 기둥과 PC 보를 일체화하였다. 1주일 간의 증기양생을 마친 후, 상·하부 PC 기둥의 주철근의 부착력 확보를 위하여 상부 PC 기둥에 매립한 스피라이스 슬리브에 무수축 몰탈을 충전하였다.

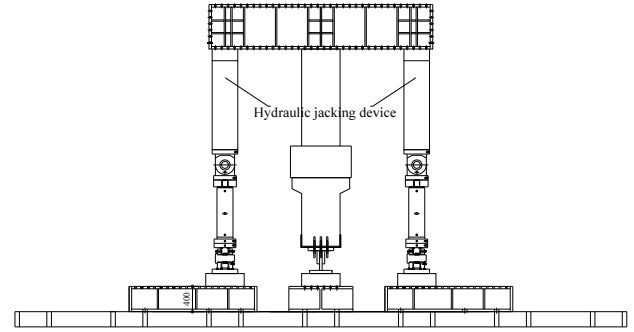
### 2.3 가력계획

Fig. 3(a)는 횡 가력 실험의 초기 세팅사진을 나타낸 것이다. 보의 양쪽 단부는 각각 힌지 철물 2개를 체결하여 롤러 지점을 구현하였으며, 기둥의 하부는 힌지 철물 1개를 사용하여 힌지 지점을 구현하였다. 또한, 강봉을 이용하여 실험체의 기둥 상부와 액추에이터(actuator)를 연결하였으며, 실험체의 가력은 변위제어 방식으로 Fig. 3(b)의 하중 프로파일(profile)에 따라 각 하중단계에 대하여 3회씩 반복가력 진행하였다.

Fig. 3(a)에 나타낸 실험체 세팅 방식으로 ALT1 실험체를 가력하는 도중 PC 기둥의 주철근과 무수축 몰탈 간의 부착



(a) Front view of revised experiment setup



(b) Side view of revised experiment setup

**Fig. 4** Revised experiment setup

력이 손실되어 주철근의 과도한 슬립이 발생하였으며, 이로 인해 실험체의 심각한 강도저하가 발생하였다. 따라서 Fig. 4에 나타낸 실험체 세팅 방식으로 수정하여 나머지 실험을 수행하였다. 수정된 실험체 세팅 방식은 PC 기둥의 슬리브 영역에서 주철근의 슬립에 의한 상부기둥의 뺨힘을 방지하기 위하여 유압잭을 통해 기둥에 100톤의 축력을 도입하는 것으로 계획하였다.

### 3. 실험결과 분석

Fig. 5에는 각 실험체의 하중-층간변위비 그래프를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이, 기둥 주철근의 과도한 슬립으로 인해 뺨힘이 발생한 ALT1 실험체는 기둥에 축력을 도입한 후에 2.0%의 층간변위비부터 가력을 진행하였다. ALT2와 ALT3는 실험 초기부터 축력을 도입하여 실험을 수행하였다. 층간변위비는 가력중심으로부터 기둥 하부에 위치한 힌지지점 중심까지의 높이에 대한 가력 중심 위치의 수평변위의 비로 산정하였으며, 기둥 하부 철물에 위치한 LVDT (linear variable differential transformer)를 통해 실시간으로 슬립량을 계측하여 가력 목표 층간변위비에 맞게 가력변위를 보정하였다.

실험체들의 공칭강도  $P_n$ 은 보 단면의 정모멘트 휨강도와 부모멘트 휨강도의 평균 휨강도를 기둥 상부의 가력점에 작용하는 횡력으로 치환하여 식 (1)과 같이 산정하였다.

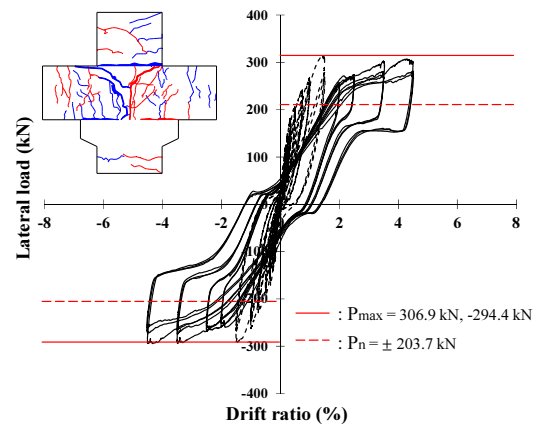
$$P_n = \frac{M_1 + M_2}{h_{eff}} \quad (1)$$

여기서,  $M_1$ 은 보의 정모멘트 휨 강도,  $M_2$ 는 부모멘트 휨 강도,  $h_{eff}$ 는 실험체의 유효높이로서, 가력 중심으로부터 기둥 하부에 위치한 힌지지점 중심까지의 거리이다. 접합부를 관통하여 배근된 철근량은 모든 실험체에서 동일하므로, 재료 강도에 따른 미소한 차이를 제외하고는 모두 유사한 접합부 공칭강도를 가지는 것으로 나타났다.

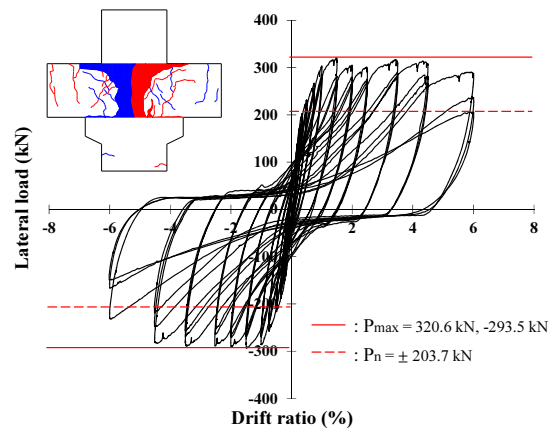
Fig. 5(a)는 ALT1 실험체의 하중-층간변위비 관계와 실험 최대강도( $P_{max}$ ), 실험체의 공칭강도를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 ALT1 실험체는 층간변위비 2.0%까지 축력을 도입하지 않고 실험을 수행하였으며, 이때의 하중-층간변위비 관계는 점선으로 표현하였다. 층간변위비 2.0% 이후에는 기둥에 축력을 도입하고 실험을 수행하였으며, 이때 하중-층간변위비 관계는 실선으로 표현하였다. ALT1 실험체는 층간변위비 0.2%에서 패널존에 위치한 좌·우측 PC 보의 이음 타설된 부위에서 균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.35%에 도달하였을 때 PC 보에서 초기 휨균열과 사인장균열이 발생하였다. 층간변위비 0.75%에서 상부 기둥에 초기 휨균열이 발생하였으며, 보에서 다수의 휨균열이 발생하였다. 층간변위비 1.32%에서 최대 강도에 도달하였으며, 이때 정방향, 부방향으로 각각 306.9 kN, -294.4 kN의 하중을 나타내었다. 이는 ALT1 실험체 공칭강도의 약 1.49배, 1.43배에 해당하는 값이다. 이후 층간변위비 2.0%에서 상부 기둥 철근의 슬립으로 인해 급격한 강도저하가 발생하였다. 실험체의 기둥에 축력을 도입하여 층간변위비 2.0%부터 재가력을 진행하였으며, 층간변위비 4.2%에서 실험체의 하중은 실험 최대강도와 유사한 수준까지 증가하였다.

Fig. 5(b)는 ALT2 실험체의 하중-층간변위비 관계를 나타내었다. ALT2 실험체는 ALT1 실험체와 유사하게 층간변위비 0.2%에서 패널존에 위치한 좌·우측 PC보의 이음 타설된 부위에서 균열이 발생하였다. 층간변위비 0.25%에서 양측 PC 보의 단부에 초기 사인장균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.35%에서는 양측 PC 보의 단부에 초기 휨균열이 발생하였다. 실험체의 최대하중은 정·부방향 층간변위비 1.48%에서 각각 320.6 kN, -293.5 kN으로 나타났다. 이는 공칭강도의 약 1.56배, 1.43배에 해당하는 값이다. 층간변위비 2.5%에서 패널존의 콘크리트가 박리되었으며, 최종적으로 층간변위비 6.0%에서 PC보 단부 콘크리트의 압괴가 진행되면서 실험을 종료하였다. 층간변위비 6.0%에서 실험체의 하중은 실험 최대강도의 91% 수준이었다.

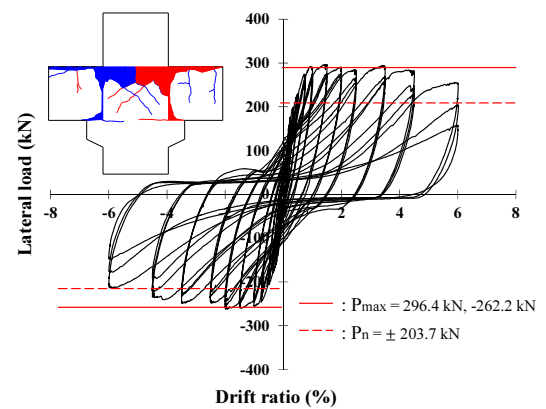
Fig. 5(c)는 ALT3 실험체의 하중-층간변위비 관계를 나타내었다. 층간변위비 0.2%에서 패널존의 계면을 따라 균열이 발생함과 동시에, 보의 상·하부에 초기 휨균열이 발생하였다. 층간변위비 0.75%에서는 패널존에 위치한 콘크리트 이음부에서 초기 사인장균열이 발생하였다. 실험체의 최대 하중은 정·부방향 층간변위비 1.46%에서 각각 296.4 kN, -262.0 kN으로 나타났다. 이는 공칭강도의 각각 1.44배, 1.27배에 해당되는 값이다. 층간변위비 3.5%에서 PC 보 단부 콘크리트의 압괴가 발생하였으며, 층간변위비 4.5%부터 하중



(a) Specimen ALT1 lateral load-drift ratio



(b) Specimen ALT2 lateral load-drift ratio



(c) Specimen ALT3 lateral load-drift ratio

Fig. 5 Lateral load-drift ratio graph of test specimens

이 다소 감소하였다. 최종적으로 층간변위비 6.0%에 도달하였을 때 토랭 콘크리트가 다수 박리되면서 PC 보의 상부 철근이 노출되어 가력을 중지하였다. 층간변위비 6.0%에서 실험체의 하중은 최대강도의 86% 수준으로 나타났다.

실험체들의 파괴모드는 모두 동일하게 PC 보 부재의 압괴로 나타났으며, 각 실험체의 실험 최대강도 또한 모두 유사한 값으로 나타났다.

기둥에 작용하는 횡하중으로 인하여 보의 단부에서 소성 모멘트 이상의 모멘트가 발생하게 되면, 보와 기둥을 관통하는 상·하부 보철근에서 부착손실이 발생할 수 있다. 이러한

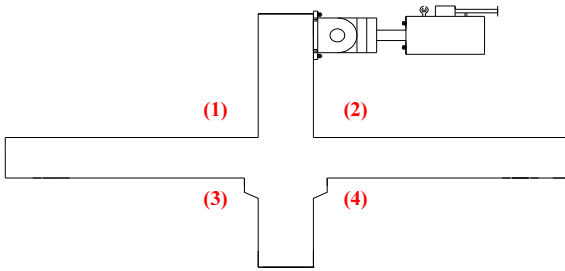
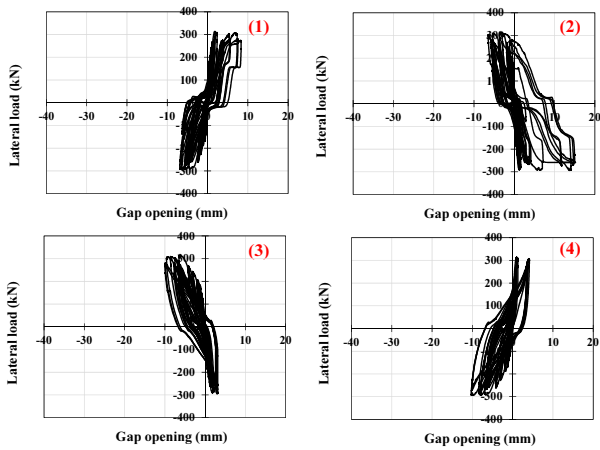
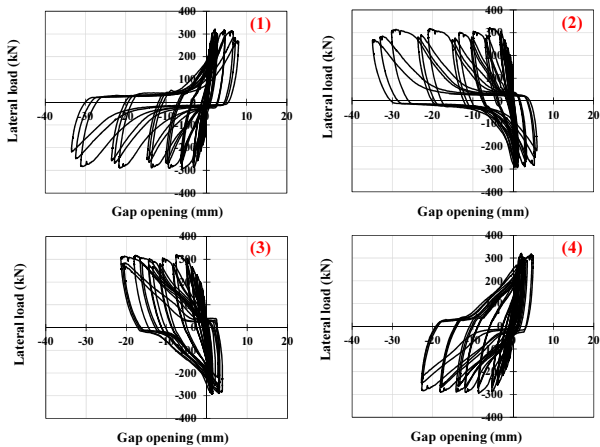


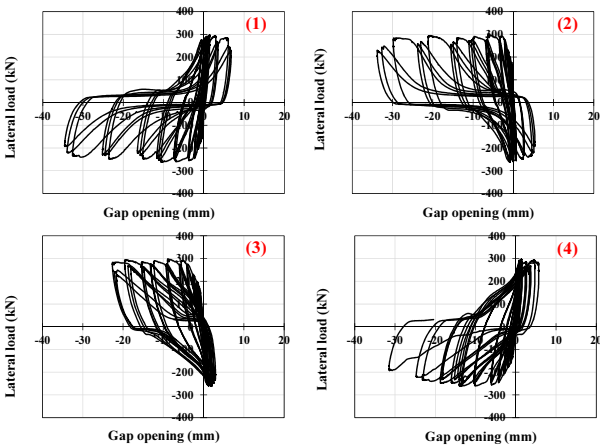
Fig. 6 Location of LVDT



(a) Gap opening of ALT1 specimen



(b) Gap opening of ALT2 specimen



(c) Gap opening of ALT3 specimen

Fig. 7 Gap opening of specimens

Table 3 Maximum gap opening of specimen

Specimen	Maximum gap opening width $w_{max}$ (mm)	Gap opening ratio $(w_{max,ALTn}/w_{max,ALT1})$
ALT1 (top)	15.14	1.00
ALT1 (bottom)	4.16	1.00
ALT2 (top)	8.01	0.39
ALT2 (bottom)	4.97	1.19
ALT3 (top)	6.78	0.35
ALT3 (bottom)	5.68	1.37

부착손실은 기둥과 접한 접합부 및 보 단부의 슬립을 발생시킬 수 있으며, 구조물의 핀칭거동(pinching behavior)을 유발하게 된다. 이 연구에서는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 LVDT를 설치하였으며, 보-기둥 계면의 오프닝 크기를 측정하였다. Fig. 7은 각 실험체의 하중-계면 오프닝 크기 관계를 나타내었으며, Table 3에는 각 실험체가 층간변위비 4.5%에 도달하였을 때 발생한 상·하부 최대 계면 오프닝 크기를 나타내었다. ALT1 실험체에서 상부 철근의 슬립으로 인하여 발생된 최대 계면 오프닝 크기는 15.14 mm이었으며, 모든 실험체중 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 축력재하 전 실험에서 상부 기둥의 주철근에서 발생한 부착손실로 인해 상부 기둥 단부의 회전각이 과다하게 발생하여 생긴 결과로 판단된다. 이에 비해 ALT2, ALT3 실험체에서 상부 철근의 슬립으로 인하여 발생된 최대 계면 오프닝 크기는 각각 8.01, 6.78 mm이었으며, 이는 상부 기둥에서의 슬립이 거의 발생하지 않았다는 것을 의미한다.

ACI 318-19에서는 접합부의 전단강도( $V_n$ )를 식 (3)으로 제시하고 있다.

$$V_n = 1.25 \sqrt{f_{ck}} b_c h \quad (3)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도,  $b_c$ 는 접합부의 유효폭,  $h$ 는 접합부의 높이이다. 접합부에 심각한 손상이 발생하면 시스템 레벨에서의 대변형이 유발된다. 따라서 접합부의 전단 파괴를 방지하기 위하여 ACI 318-19에서는 식 (3)과 같이 계산된 접합부의 전단강도( $V_n$ )가 소요전단력( $V_u$ )인 식 (4) 값보다 크도록 규정하고 있다.

$$V_u = 1.25(C + T) - V_{col} \quad (4)$$

여기서,  $C$ 와  $T$ 는 각각 양측 보의 단면에서 발생하는 철근의 최대 압축력과 인장력을 의미하며,  $V_{col}$ 는 횡하중에 의해 기둥에서 발생하는 수평방향 전단력을 의미한다.

식 (3)을 이용하여 산정한 ALT1~3 실험체의 접합부 전단강도는 2,176 kN이며, 식 (4)를 이용하여 산정된 소요전단력은 1,799 kN이다. Fig. 8은 실험 종료 후 ALT2 실험체 접합부 영역의 균열 사진을 나타낸 것이다. 다수의 균열로 인하여

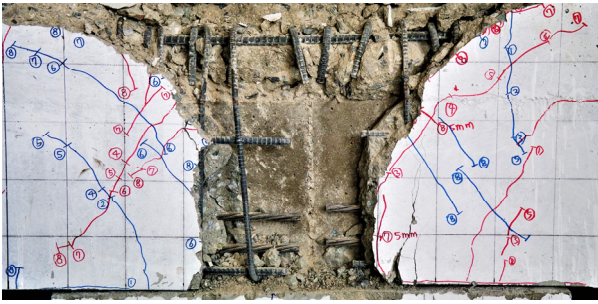


Fig. 8 Joint crack patterns of specimen ALT2

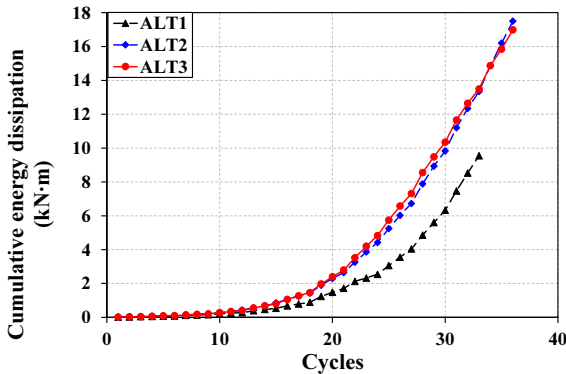


Fig. 9 Cumulative energy dissipation of test specimens

피복 영역의 콘크리트는 박리되었지만, 접합부 내부의 손상은 경미한 것으로 나타났다. 이와 같은 균열 형상은 모든 실험체에서 유사하게 나타났다.

PC 보-기둥 접합부가 우수한 내진성능을 발휘하기 위해서는 기둥에 비해 상대적으로 낮은 강도를 갖는 보가 먼저 항복한 후에 소성힌지 영역에서 에너지 소산이 충분히 이루어져야 한다. 따라서 누적 에너지 소산량은 구조물의 내진성능을 판단할 수 있는 중요한 지표가 된다(Ozden et al. 2011; Choi et al. 2018). Fig. 9에는 각 실험체의 층간변위비에 따른 누적 에너지 소산량을 비교하여 나타내었다. ALT2 실험체와 ALT3 실험체의 층간변위비 4.5% 도달 시 누적 에너지 소산량은 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다. ALT1 실험체의 경우 축력을 도입하지 않은 실험 단계에서 상부 기둥의 주철근이 부착을 손실하며 강도가 조기에 저하되었기 때문에 다른 실험체들에 비해 상대적으로 낮은 누적 에너지 소산량을 나타내었다.

#### 4. 실험체별 성능검증

ACI 318-19에서는 RC 부재 이외의 특수한 형태의 콘크리트 시스템에 대하여 ACI 374 report에 제시된 허용기준을 만족하는 경우, 일체식으로 타설된 RC 특수모멘트 골조와 동등한 수준의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 간주한다. 따라서 이 연구에서는 ACI 374 report에서 제시된 허용기준을 통하여 와이드거더-기둥 접합부의 내진성능을 평가하였다.

ACI 374 report 9.1.1은 실험체의 적절한 초기 강성확보를 위하여 실험체의 설계강도 도달 시점의 층간변위비( $\theta_n$ )를

Table 4 Performance evaluation of specimens based on ACI 374 report 9.1.1

Specimen		ALT1	ALT2	ALT3
$\theta_n$ (%)	(+)	0.54	0.38	0.39
	(-)	-0.61	-0.43	-0.52
$\theta_{allow}$ (%)	(+)	2.0		
	(-)			
Acceptance criteria ( $\theta_{allow} \geq  \theta_n $ )	(+)	Accept	Accept	Accept
	(-)	Accept	Accept	Accept

Table 5 Performance evaluation of specimens based on ACI 374 report 9.1.2

Specimen		ALT1	ALT2	ALT3
$\Omega_0$	(+)	1.49	1.56	1.44
	(-)	-1.43	-1.43	-1.27
$\lambda$	(+)	1.97		
	(-)			
Acceptance criteria ( $\lambda \geq \Omega_0$ )	(+)	Accept	Accept	Accept
	(-)	Accept	Accept	Accept

IBC(international building code)에서 제시하는 허용층간변위비( $\theta_{allow}$ )를 통해 제한하는 규정이다. 이 연구에서는 실험체들의 프로토타입(prototype)을 몰류센터로 설정하였기 때문에  $\theta_{allow}$ 를 일반적인 건축물(내진등급)에 해당하는 2.0%로 설정하였다. Table 4에서 나타난 바와 같이 모든 실험체는 ACI 374 report 9.1.1 규정에 따른 허용층간변위비를 만족하는 것으로 나타났다.

ACI 374 report 9.1.2는 강기둥-약보의 설계 철학을 만족시키기 위하여, 실험체의 실험 최대강도에 대한 공칭강도의 비( $\Omega_0$ )가 기둥과 보의 강도비로 정의되는 설계초과강도계수( $\lambda$ ) 이하의 값을 가져야 한다는 규정이다. Table 5에는 해당 규정에 따른 내진성능 평가결과를 나타내었으며, 결과적으로 모든 실험체에서 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

ACI 374 report 9.1.3은 특수한 형태의 콘크리트 부재가 층간변위비 3.5%의 세 번째 cycle까지 유효한 내진성능을 보유하고 있는지를 판단하기 위한 규정으로써, 실험체의 강도, 에너지소산능력, 강성비의 측면으로 허용기준을 제시하고 있다. ACI 374 report 9.1.3-1은 층간변위비 3.5%의 세 번째 cycle에서 측정된 실험체의 하중( $P_{3.5\%}$ )이 실험 최대하중( $P_{max}$ )의 0.75배 이상이어야 한다는 규정이다. ACI 374 report 9.1.3-2는 동일한 층간변위비 시점에서 실험체의 에너지 소산면적비( $\beta$ )가 0.125 이상의 값을 가져야 한다고 제시하고 있다. 마지막으로 ACI 374 report 9.1.3-3은 해당 시점에서 과도한 편칭 거동을 제한하는 규정으로써, 층간변위비 -3.5%부터 3.5%까지의 활선강성( $K_{s,3.5\%}$ )이 초기강성( $K_i$ )의 5%보다 클 것을 명시하고 있다. Tables 6~8은 ACI 374 report 9.1.3에 대한 내진성능 평가 결과를 나타낸 것이며, 모든 실험체에서 해당 규정을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 다만, ALT3 실험체가

**Table 6** Performance evaluation of specimens based on ACI 374 report 9.1.3-1

Specimen		ALT1	ALT2	ALT3
0.75 $P_{max}$ (kN)	(+)	230.51	240.40	222.27
	(-)	-220.76	-220.16	-196.47
$P_{3.5\%}$ (kN)	(+)	273.35	269.66	253.48
	(-)	-265.56	-256.92	-232.20
Acceptance criteria (0.75 $P_{max} \leq P_{3.5\%}$ )	(+)	Accept	Accept	Accept
	(-)	Accept	Accept	Accept

**Table 7** Performance evaluation of specimens based on ACI 374 report 9.1.3-2

Specimen	ALT1	ALT2	ALT3
( $\beta$ )	0.28	0.28	0.26
Acceptance criteria ( $\beta \geq 0.125$ )	Accept	Accept	Accept

**Table 8** Performance evaluation of specimens based on ACI 374 report 9.1.3-3

Specimen	ALT1	ALT2	ALT3
$K_{s,3.5\%}$ (kN/mm)	91.74	33.93	16.64
0.05 $K_I$ (kN/mm)	29.85	30.78	29.98
Acceptance criteria ( $K_{s,3.5\%} \geq 0.05K_I$ )	Accept	Accept	Unaccept

ACI 374 report 9.1.3-3의 규정을 만족하지 못하였는데, 이는 ALT3 실험체의 보 사이에 위치한 접합 부위의 이음 콘크리트가 이른 시점에 박리되었기 때문으로 판단된다. 결과적으로 이 연구에서 제안한 와이드거더-기둥 접합부는 PC 보 단부의 콘크리트 이음부에 충분한 횡보강근을 배근한다면 RC 특수모멘트 골조의 접합부와 거의 동등한 내진성능을 보일 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 접합부의 배근상세를 변수로 총 3개의 와이드거더-기둥 접합부 실험체를 제작하고 반복가력실험을 수행하였다. 각 실험체의 하중-층간변위비 관계, 보-기둥 계면 오프닝 크기, 패널존의 전단거동, 누적 에너지 소산량을 상세히 비교하였으며, ACI 374 report에 제시된 허용기준에 따라 내진성능 평가를 수행하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 모든 실험체는 현행 구조기준에 따라 산정된 공칭강도를 상회하는 내력을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 기둥단면 내부로 갈고리 철근이 정착되는 ALT1 실험체는 접합부 영역에 직선철근만을 배치한 ALT2 실험체, 기둥 외부로 갈고리 철근이 정착되는 ALT3 실험체와 최대강도 및 최대강도 발현시점이 유사한 것으로

나타났다. 다만, 축력을 도입하지 않고 수행한 실험단계에서 상부 기둥 주철근의 슬립이 발생하였으며, 이에 따라 ALT2, ALT3 실험체에 비하여 최대 층간변위비가 상대적으로 낮게 나타났다. ALT2 실험체와 ALT3 실험체는 층간변위비 3.5%까지 최대강도를 포함한 전반적인 거동이 유사한 것으로 나타났다. 다만, ALT2 실험체와 비교하여 ALT3 실험체는 층간변위비 3.5%의 세 번째 cycle에서부터 하중 저감이 크게 발생하였다.

- 2) ACI 374 report에 근거하여 접합부의 배근 상세 별로 와이드거더-기둥 접합부의 내진성능을 평가한 결과, ALT1 실험체와 ALT2 실험체는 모든 규정을 만족하는 것으로 나타났다. 다만, ALT3 실험체의 경우 ACI 374 report 9.1.3-3의 허용기준을 만족하지 못하였는데, 이러한 문제를 개선하기 위해서는 PC 보 단부의 콘크리트 이음부에 충분한 횡보강근이 배근되도록 고려해야 할 것으로 판단된다.
- 3) 이 연구에서는 와이드거더-기둥 접합부를 관통하는 철근의 배근상세를 주요 변수로 총 3가지의 배근 상세를 제안하였으며 건설 현장에서의 시공 조건에 따라 유용적으로 접합부 상세를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다(NRF-2019R1A2C2086388). 또한, (주)대림 건설의 재정적 지원에도 감사드립니다.

## References

- ACI Committee 318 (2019) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI). 623.
- ACI Committee 374 (2005) *Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements Under Slowly Applied Simulated Seismic Loads (ACI 374.1-05)*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI).
- Behnam, H., Kuang, J. S., and Samali, B. (2018) Parametric Finite Element Analysis of RC Wide Beam-Column Connections. *Computers and Structures* 205, 28-44.
- Benavent-Climent, A. (2007) Seismic Behavior of RC Wide Beam-Column Connections under Dynamic Loading. *Journal of Earthquake Engineering* 11, 493-511.
- Choi, S. H., Hwang, J. H., Lee, D. H., Kim, K. S., Zhang, D., and Kim, J. R. (2018) Experimental Study on RC Frame Structures Strengthened by Externally-Anchored PC Wall Panels. *Computers and Concrete* 22, 383-393.
- Elsoury, A. M., and Harajili, M. H. (2015) Interior RC Wide Beam-Narrow Column Joints: Potential for Improving Seismic Resistance. *Engineering Structures* 99, 42-55.



- Fawda, I., Ali, T. A., Nazih, E., and Sara., M. (2014) Reinforced Concrete Wide and Conventional Beam-Column Connections Subjected to Lateral Load. *Engineering Structures* 76, 34-48.
- Gentry, T. R., and Wight, J. K. (1994) Wide Beam-Column Connections under Earthquake-Type Loading. *Earthquake Spectra* 10(4), 675-703.
- ICC (2018) *International Building Code (IBC 2018)*. Washington, D.C; International Code Council (ICC).
- Li, B., and Kulkarni, A. (2010) Seismic Behavior of Reinforced Concrete Exterior Wide Beam-Column Joints. *Journal of Structural Engineering* 136(1), 26-36.
- Mirzabagheri, S., Tasnimi, A. A., and Mohammadi, M. S. (2016) Behavior of Interior RC Wide and Conventional Beam-Column Roof Joints under Cyclic Load. *Engineering Structures* 111, 333-344.
- NZS (2004) *Structural Design Actions. Part 5: Earthquake Actions, NZS 1170.5*. New Zealand Standards (NZS), Wellington.
- NZS (2006) *Concrete Structures Standards: Part 1-The Design of Concrete Structures, NZS 3101 Part 1*. New Zealand Standards (NZS), Wellington.
- Ozden S., Akguzel, U., and Ozturan, T. (2011) Seismic Strengthening of Infilled Reinforced Concrete Frames with Composite Materials. *ACI Structural Journal* 108, 414-422.
- Quintero-Febres, C., and Wight, J. K. (2001) Experimental Study of Reinforced Concrete Interior Wide Beam-Column Connections Subjected to Lateral Loading. *ACI Structural Journal* 98, 572-582.
- Siah, W. L., Stehle, J. S., Mendis, P., and Goldsworthy, H. (2003) Interior wide Beam Connections Subjected to Lateral Earthquake Loading. *Engineering Structures* 25, 281-291.

---

**요 약** 이 연구에서는 슬래브의 부피를 감소시킴으로써 경제성을 확보할 수 있는 프리캐스트 와이드거더를 개발하였다. 보와 기둥을 관통하는 철근의 배근상세를 주요 변수로 하여 총 3개의 프리캐스트 와이드거더-기둥 접합부 실험체를 제작하였으며, 횡방향 반복가력 실험을 통해 실험체들의 구조성능을 비교 및 분석하였다. 또한 ACI 374 report에서 제시하는 허용기준을 통해 프리캐스트 와이드거더-기둥 접합부의 내진성능을 정량적으로 평가하였다.

**핵심용어** : 와이드거더, 프리캐스트 콘크리트, 보-기둥 접합부, 패널존, 내진성능