대공간 교육시설 축조를 위한 프리스트레스트 보에 사용되는 접합 강재의 성능평가에 대한 연구

A Study for Structural Capacity Evaluation of Embedded Steel Plate Connected with Prestressed Concrete Beam to Build Large Space Educational Facilities

이 경 훈*
Lee, Kyoung-Hun

Abstract

An experimental study to evaluate structural capacity of an embedded plate connected with prestressed concrete beam was performed. Embedded steel plates and prestressed concrete beam were connected with stud-bolts at the ends of concrete beam specimens. About 1,000 kN concentrated load was applied at 450mm away from the end of beam specimen. A 3,000 kN capacity static Oil-jack was used to direct concentrated load.. The maximum strain of stud-bolt recorded $90 \times 10^{-6} (mm/mm)$ and wide width cracks were not founded. Any falling failures of concrete and large deformations were not founded either between steel plate and prestressed concrete specimen. As a result, construction performance can be improved using this embedded steel plate connection system apply to large space educational facilities.

키워드 : 프리스트레스트 콘크리트 보, 매립강재접합, 스터드볼트 접합

Keywords : Prestressed Concrete Beam, Embedded Steel Plate Connection, Stud Bolt Connection

I. 서론

I-1. 연구 배경 및 목적

최근 선진국을 중심으로 추진되고 있는 환경 친화적인 건축기술개발 동향에 따라 국내에서도 친환경 건축에 대한 관심이 높아지고 있다. 프리캐스트 콘크리트 공법(이하 'PC 공법')은 공장에서 제작된 부재를 현장에 반입한 후 조립하여 구조물을 축조하는 공법으로, 현장타설 콘크리트 공법인 철근콘크리트 공법(이하 'RC 공법')에 비하여 건설폐기물의 발생이 적은 친환경 공법 중의 하나이다. 그러나 PC 공법은 2005년에 발생한 00물류센터 공사현장의 붕괴사고 등을 통하여 접합부의 성능이 일체식 구조인 RC 공법에 비하여 취약하다고 판단되어 한동안 현장적용이 기피되었다. PC 공법 중 프리스트레스트 공법은 강연선을 배치한 후 큰 긴장력을 도입하여 상향솟음(camber)를 발생시킴으로써 장스팬 구조의 축조에 매우 유리한 공법이므로 초고층화, 대형화되어가는 건설추세를 감안한다면 취약한 접합부의 구조 및 시공성능을 보완하여 실무에 적용하는 방안을 마련하는 연구가 필요하다.

신영수 등[1]은 '프리스트레스트 콘크리트의 개념 및 활용'을 통하여 프리스트레스트 보는 "같은 스팬의 철골구조에 비하여 약 20~40% 정도의 경제성을 보유하는 구조형식"임을 언급하였다. 김계중 등[2]은

* 전남대학교 바이오하우징사업연구단 연구원

1) 신영수, 프리스트레스트 콘크리트의 개념 및 활용, 대한건축학회지, 제39권, 제8호, 1995, p.63~67

PC 부재의 접합부 성능을 향상시키기 위하여 다양한 형태의 합성 PC보에 대한 접합성능 실험을 수행하였으며, 접합부 성능을 향상시키기 위하여 개발된 별도의 접합철물을 이용하여 시공을 수행한 결과 기둥 1개와 보 9개를 시공하는 기간이 1일 이내로 소요되어 시공성이 좋은 것으로 나타났다. 최은규 등[3]은 다양한 단면형상을 갖는 PC 보의 실험과 해석연구를 통하여 중앙부 및 단부의 구조적 성능을 평가하여 PC 부재의 시공성 및 구조적 안전성을 입증하는 연구를 수행하였다. 또한 김규리 등[4]은 반복하중을 받는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 거동을 평가하고 시스템을 개발하는 연구를 수행하였다. 실험결과 간편한 볼트접합방식 등에 의해서 시공되는 접합부의 연성능력은 우수한 것으로 나타났으며 일체식 접합부 시험체보다 균열이 적게 발생하는 것으로 나타났음을 피력하고 있다. 류창희 등[5]은 하이브리드 프리캐스트 보-기둥 접합부 실험을 통하여 PC 부재의 접합성능을 평가하는 연구를 수행하여 일체식 구조인 RC 접합부와 유사한 구조성능을 발휘함을 피력하였는데, 동일한 접합부 성능을 보유한다면 PC 공법은 공사기간이 단축되고 또한 탄소배출량을 억제할 수 있으므로 친환경 공법으로 각광받을 수 있을 것이다.

일체식으로 접합부가 형성되는 RC 공법은 현장에서 거푸집을 설치하고 콘크리트를 타설한 후 탈형을 하는 과정이 필요하여 공정이 지연되는 현상이 발생하게 된다. 반면, 철골구조의 접합은 접합부의 구조적 안전성이 입증된 구조형식으로 많은 현장에서 시공이 이루어진 일반화된 공법이다. 본 연구에서는 PC 보의 단부에 강재를 삽입하여 접합방식을 철골보와 동일하게 시공함으로써 공사기간이 단축되고 또한 접합부의 안전성을 신뢰할 수 있는 새로운 PC 보 접합부를 개발하였다. 삽입된 강재와 PC 보는 스터드볼트에 의하여 고정되어 있는데, 본 논문에서는 삽입된 강재와 PC 보 사이의 구조적 안전성을 평가하여 실무에 반영할 수 있는 설계 근거를 제시하는 것을 목적으로 한다.

I-2. 연구 범위 및 방법

PC 보 단부에 매립된 강판과 PC 보와의 접합은 보-기둥 접합부의 안전성 뿐만 아니라 구조물의 전체 안전에까지 영향을 미치는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 실물크기의 시험체를 제작하여 실제 접합과 동일하게 철골 보에 고력볼트로 접합한 후 보 단부에서 450mm 이격된 거리에 최대 1,000kN의 집중하중을 가력하며 실험을 수행하였다. 실험결과로 시험체의 균열양상 및 접합부 거동을 분석하였으며, 스터드볼트에 부착된 스트레인 게이지로부터 스터드볼트의 변형률을 평가하였다.

매립강판과 PC 보와의 설계는 PCI Design Handbook[9]을 비롯한 국내·외 설계기준에서 요구하는 성능을 만족할 수 있도록 이론을 정립하였다.

II. 단부 매립 강판의 힘의 흐름

그림1에서는 강판이 매립된 보 단부에서 발생하는 힘의 흐름을 나타내고 있다.

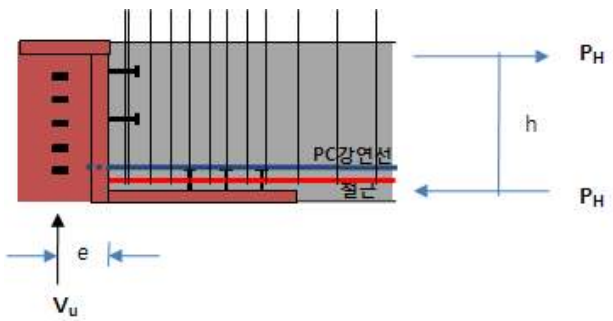

그림1. 강판이 매립된 PC 보 단부에서 힘의 평형

보에 수직하중이 작용하면 그림1과 같이 고력볼트 접합위치에서 발생하는 수직전단력 V_u와 편심거리를 곱한 모멘트 $V_u \cdot e$가 매립된 강판에 작용한다. PC 보 마구리 부분의 수직강판에는 스터드볼트를 설치하였으며 인장철근을 본 수직강판에 용접합으로써 부착성능을 향상시키도록 하였다. 수직강판에 설치된 스터드볼트와 인장철근은 우력으로 작용하는

---

2) 김계중 외, PC 합성보의 접합부 설계 및 제작, 한국콘크리트학회 2010년 가을학술대회논문집, 제22권, 제2호, 2010, p.471~472

3) 최은규 외, PC 합성보의 현장 적용시 구조거동, 한국콘크리트학회 2010년 가을학술대회논문집, 제22권, 제2호, 2010, p.253~254

4) 김규리 외, 반복하중을 받는 프리캐스트콘크리트 보-기둥 접합부의 거동 연구, 한국콘크리트학회 2004년 가을학술대회논문집, 제16권, 제2호, 2004, p.619~622

5) 류창희 외, 하이브리드 프리캐스트 보-기둥 접합부의 개발, 한국콘크리트학회 2009년 가을학술대회논문집, 제21권, 제2호, 2009, p.21~22

한 쌍의 P_H 중 인장력에 저항하도록 설계가 수행된다. 또한 수직방향으로 작용하는 전단력은 수직강판에 설치된 스터드볼트와 용접된 인장철근의 수평전단강도보다 작아야 하며, 보 바닥에 위치한 수평플레이트에 설치된 스터드볼트는 전단력 V_u와 모멘트에 저항할 수 있게 설계되어야 한다. 그림2는 수직강판에 작용하는 전단력(V_u)과 모멘트($V_u \cdot e$), 그리고 수평강판에 작용하는 전단력(P_H)과 우력($P_H \cdot h$)을 나타내고 있다.

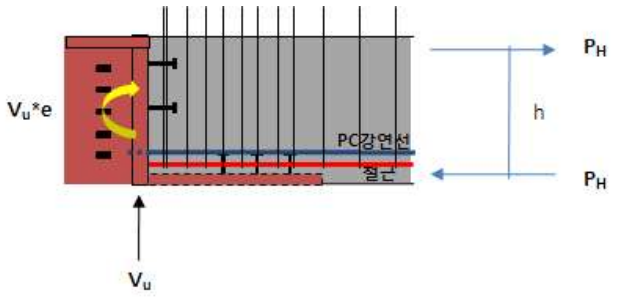

그림2. PC 보 단부 수직강판의 설계 개념

보 내부에서 발생하는 우력에 대해서는 수직강판에 설치된 스터드볼트의 개별 뽑힘 및 그룹 뽑힘 성능이 저항하며, 수평강판에 설치된 스터드볼트의 수평전단강도 또한 우력에 저항할 수 있게 설계하여야 한다.(그림3) 보 단부에서는 전단력이 크게 발생하는 구간이므로 그림2와 그림3에 나타난 수직 및 수평철판의 스터드 볼트 외에 보 단면 중앙에 삽입되는 철판을 별도로 제작하여 양 쪽에 스터드볼트를 추가로 배치하여 예상하지 못한 큰 하중이 작용했을 때 취성파괴를 방지할 수 있도록 고려하였다.

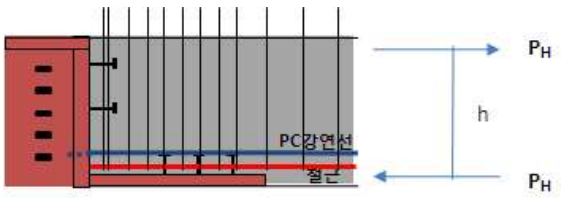

그림3. PC 보 단부 하부강판의 설계 개념

보 단부에서 발생할 수 있는 파괴형상을 살펴보면 크게 그림4에 표현된 두 가지 파괴양상으로 구분될 수 있다. 첫 번째는 수평강판 끝에서 사선방향으로 발생하는 사인장균열에 의한 파괴양상이며, 두 번째는 동일 위치에서 발생된 균열이 단부 쪽으로 진행되면서 탈락되는 현상이다. ①번과 같은 파괴양상은 일반적인 콘크리트 보에서 발생할 수 있는 균열양상으로, 이에 대해서는 콘크리트의 전단성능과 전단철근의 전단성능이 작용하는 전단하중에 적절하게 저항하도록 설계를 수행한다. 또한 ②번과 같은 파괴양상은 철판이 없는 경우 단부 모서리에서 탈락이 발생되기도 하지만 본 시험체는 단부에 강판이 설치되어 균열의 진행을 방지할 수 있다. 그럼에도 안전상의 이유로 이러한 파괴거동이 발생하지 않도록 콘크리트의 전단성능과 전단철근의 전단성능이 저항할 수 있게 설계를 수행하고 추가로 용접된 인장철근이 본 거동에 저항하여 안전성을 높이도록 하였다.

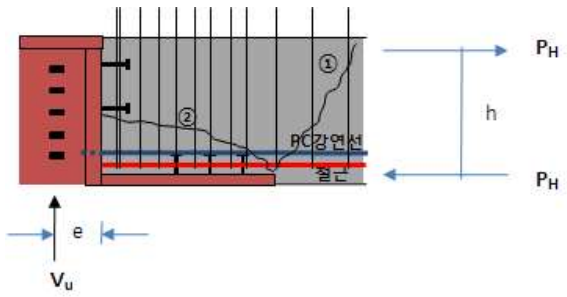

그림4. PC 보 단부에서의 파괴양상

III. 시험체의 설계 및 제작

본 연구에서는 프리스트레스트 보의 양단에 매립된 강재의 접합성능을 평가하는 실험을 수행하였다. 시험체의 PC 콘크리트의 설계기준강도는 50MPa, 슬래브 콘크리트의 설계기준강도는 24MPa 이며, 8-SWPC7B 15.2mm 강연선을 이용하여 프리스트레싱을 도입하였다. 또한 PC 보 상단에는 프리스트레싱 도입 시 보 상부에 발생하는 인장력에 저항할 수 있도록 4-HD22 보강철근을 배근하였다(그림5). 그 밖의 재료의 특성은 표1과 같다.

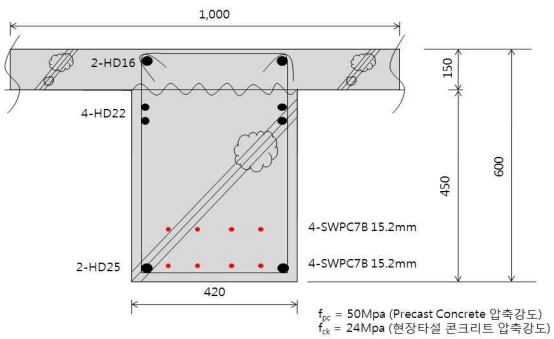

그림5. 시험체 단면형상[6)]

6) 이경훈 외, 강판으로 접합된 프리스트레스트 콘크리트 보의 구조성능 평가를 위한 실험연구, 한국방재학회논문집, 제10권, 제5호, 2010, p.27~33

표 1. 재료의 특성

Concrete(MPa)						Steel(MPa)				Strand(MPa)		Stud bolt	
f_{ci}	f_{pc}	f_{ck}	E_{ci}	E_{pc}	E_c	f_y	F_y	E_s	E_{ss}	f_{pu}	E_{ps}	V_{sn}(kN)	f_{ys}(MPa)
35	50	24	27,223	31,034	23,025	400	325	200,000	20,5000	1882	188,200	114	235

강연선의 탄성계수는 ASTM[7]-Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete에 따라 변형률 0.1% 일 때의 하중을 항복하중으로 가정하여 계산한 값을 사용하였다. 스터드볼트는 19X125mm 규격을 사용하였으며 한 개가 저항할 수 있는 전단하중은 약 114kN 이다.

보 단부에 매립된 강판에 직접적으로 큰 하중을 부담시키기 위하여 그림6과 같이 단부에서 약 450mm 이격된 위치에 3,000kN 용량의 정적가력기를 설치하여 약 1,000kN까지 집중하중을 가력하였다.

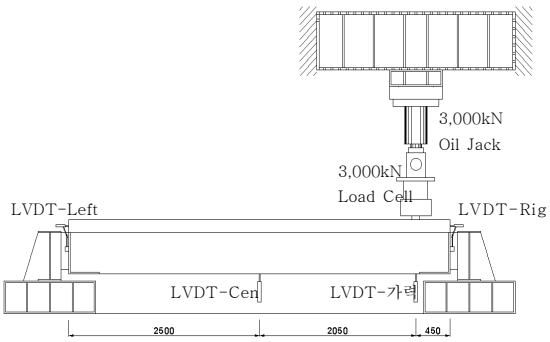

그림 6. 시험체의 세팅[6]

그림7은 매립 강판과 콘크리트 보에서 발생하는 변형률을 측정하기 위하여 보 단부 스터럽과 스터드볼트에 게이지를 부착한 위치를 나타내고 있다. 보 길이방향과 같은 방향으로 배치된 ST1 스트레인 게이지로부터 얻은 변형률을 근거로 강판과 콘크리트 사이의 변형정도를 분석하였다.

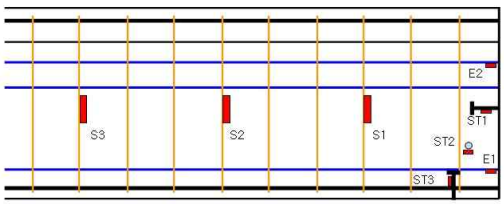

그림 7. 스트레인 게이지 배치도

7) ASTM Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete

IV. 접합용 매립강판의 설계

접합용 매립강판은 스터드볼트에 의하여 콘크리트 보와 부착이 되어있는데, 스터드볼트의 설계는 다음 절차에 따라 수행하였다.

① 콘크리트의 cone failure

강판에 설치된 스터드볼트 각각의 콘크리트 콘 파괴(cone failure)에 대하여 검토하며 이때의 인장강도는 다음과 같다.

$$\Phi P_c = \Phi A_0 \left(0.24\lambda \sqrt{f_{ck}}\right) \quad (2)$$

여기서, $\Phi = 0.85$

A_0= 콘크리트 cone failure surface의 면적 $(= \sqrt{2}\, l_e \pi (l_e + d_h))$

② 스터드볼트의 설계인장강도

스터드볼트에 큰 하중이 작용하여 콘크리트가 뽑히기 전에 스터드볼트가 인장에 의하여 항복에 도달하는 것을 방지하여야 하는데, 이때 스터드볼트의 인장강도는 다음과 같다.

$$\Phi P_c = \Phi A_b f_y = 315 A_b \quad (3)$$

여기서, $\Phi = 0.9$

$f_y = 235$ MPa

③ 전단강도

콘크리트의 전단파괴에 의해 지배되는 설계전단강도는 식(3)과 같고, 스터드볼트의 전단파괴에 의해 지배되는 설계전단강도는 식 (4)와 같다.

$$\phi V_c = \phi V'_c C_w C_t C_c \quad (4)$$

여기서, $\Phi = 0.85$

$$\phi V_y = \phi 0.9 f_y A_b n \quad (5)$$

여기서, $\Phi = 0.9$

④ 조합력

인장과 전단의 조합력을 받는 스터드볼트의 설계강도는 아래의 상호관계식을 만족하여야 한다.

콘크리트

$$\frac{1}{\phi}\left[\left(\frac{P_u}{P_c}\right)^2 + \left(\frac{V_u}{V_c}\right)^2\right] \le 1.0 \quad (6)$$

여기서, $\Phi = 0.85$

스터드볼트

$$\frac{1}{\phi}\left[\left(\frac{P_u}{P_s}\right)^2 + \left(\frac{V_u}{V_s}\right)^2\right] \le 1.0 \quad (7)$$

여기서, $\Phi = 0.9$

V. 실험결과 고찰

그림8은 실험이 진행되는 동안 가력점과 보 중앙에서 기록한 하중-변위 그래프이다. 설계하중보다 큰 1,000kN 정도의 하중을 가력하는 동안에 변위의 급격한 변화는 없었으며 지속적으로 변형이 발생하며 하중에 잘 저항하는 거동을 나타내고 있다.

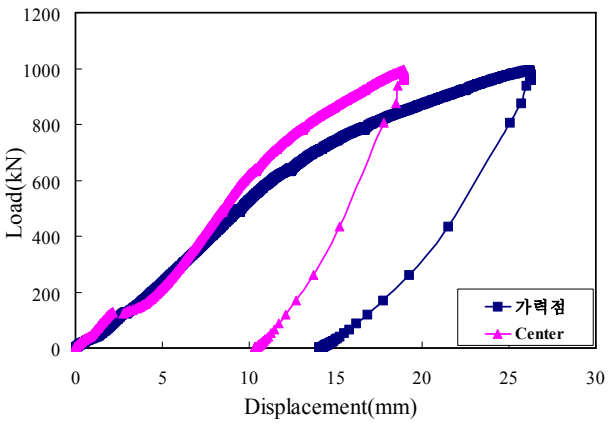

그림8. 가력점과 중앙에서의 하중-변위 곡선

그림9는 스터드볼트에 부착된 스트레인 게이지의 변형률을 나타내는 그래프이다. 하중을 가력하지 않은 상태에서는 프리스트레싱으로 인하여 솟음(camber)이 발생해 있는 상태에서 하중을 가력하면 ①과 같이 미소한 변형률이 수축으로 나타난다. 약 150kN의 하중 이후로 게이지는 수축에서 신장으로 전환되며 지속적으로 변형률이 증가하다가 약 750kN에 도달한 후 다시 수축 변형률이 발생하게 된다. 이러한 거동은 가력점에서의 변위가 약 15mm(그림8) 정도 발생하면서 스터드볼트가 설치된 위치에서 콘크리트와 강판사이에 압축력이 작용함에 따라 나타나는 거동이라 할 수 있다. 하중이 1,000kN에 도달할 때까지 콘크리트와 강판은 더 이상 큰 변형이 발생하지 않고 오히려 변형률이 감소하는 경향이 나타나, 매립강재의 부착 및 접합성능은 설계강도를 크게 상회하며 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

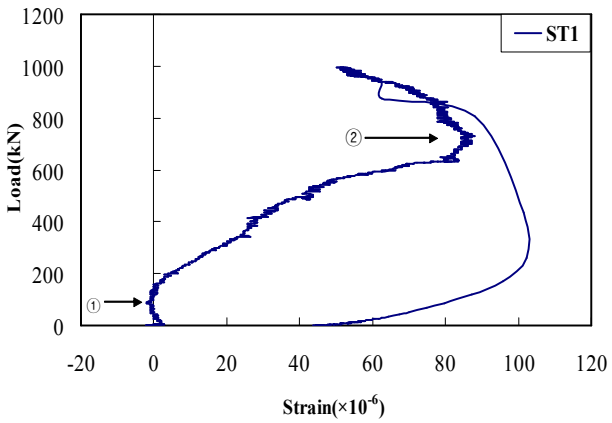

그림9. 스터드볼트의 변형률

그림10은 시험체 가력지점에서의 균열을 관측한 사진이다. 균열은 하중가력 지점 하부에서 발생하여 점점 보 상부로 진행되었으며 또한 매립강판의 끝부분에서도 균열이 발생되어 가력지점으로 발전되었다. 매립강판과 고력볼트로 접합된 시험체 지점사이와 매립강판과 콘크리트 사이에서는 실험이 종료될 때까지 구조물의 안전에 큰 영향을 미치는 균열이나 변형은 발생하지 않았다.

그림10. 시험체 균열양상

VI. 결론

매립강판으로 접합된 프리스트레스트 보의 접합부 성능과 매립강판과 콘크리트 사이의 구조적 안전성을 평가하는 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

① PC 보 단부에 삽입된 강판은 설계하중을 크게 상회하는 집중하중을 가력한 경우에도 탈락되지 않고 강판에 설치된 스터드볼트는 모두 작은 변형만을 나타내어 안전한 접합성능을 보유하고 있음을 알 수 있었다.

② 강판과 콘크리트 보는 보 마구리의 수직강판과 보 하부의 수평강판에 설치된 스터드볼트에 의해서 접합되도록 설계를 수행하며, 전단력이 크게 작용하는 단부의 특성을 고려하여 보에 삽입된 강판에 추가로 스터드볼트를 설치하였다. 이는 결과적으로 큰 집중하중에도 접합부와 단부에서 매우 안전정인 거동이 나타났음을 확인하여 예상치 못한 하중에 대해서도 붕괴 등의 위험요소에 적절히 대응하는 구조라 할 수 있다.

③ 결과적으로 스터드볼트에 의한 강판의 접합설계과정은 안전적인 측면에서 매우 적절하다고 판단된다.

④ 시험체 단부에서 설계하중을 크게 상회하는 약 1,000kN의 집중하중을 가력하는 동안에 스터드볼트에 부착된 스트레인 게이지의 응답을 살펴본 결과 최대 약 $90\times10^{-6}(mm/mm)$ 의 변형률이 발생하여 뽑힘이나 항복 등의 상태에는 도달하지 않았음을 알 수 있었다.

⑤ 실험이 진행되는 동안 가력지점 하부에서 발생된 균열은 단부쪽을 향하여 진행되었으나 시험체의 탈락 등의 큰 변형은 발생하지 않았고 단부에 매립된 강판 또한 크게 변형을 일으키지 않아서 매우 안전한 접합성능을 보유하고 있음을 확인하였다.

⑥ 본 실험은 접합부에서 약 450mm 이격된 거리에서 큰 집중하중을 가력하여 실험을 수행하므로 매립된 강판에 큰 하중이 직접적으로 가해졌으며 콘크리트 보에는 압축대가 형성되는 거동이 나타났다. 향후 전단경간비에 따른 추가 실험을 수행하여 매립강판 및 고력볼트 접합부의 안전성을 평가하는 연구는 본 시스템의 활발한 현장적용을 위한 좋은 연구가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 신영수, 프리스트레스트 콘크리트의 개념 및 활용. 대한건축학회지, 제39권, 제8호, 1995
2. 김계중 외, PC 합성보의 접합부 설계 및 제작, 한국콘크리트학회 2010년 가을학술대회논문집, 제22권, 제2호. 2010
3. 최은규 외, PC 합성보의 현장 적용시 구조거동, 한국콘크리트학회 2010년 가을학술대회논문집, 제22권, 제2호, 2010
4. 김규리 외, 반복하중을 받는 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 거동 연구, 한국콘크리트학회 2004년 가을학술대회논문집, 제16권, 제2호, 2004
5. 류창희 외, 하이브리드 프리캐스트 보-기둥 접합부의 개발, 한국콘크리트학회 2009년 가을학술대회논문집, 제21권, 제2호, 2009
6. 이경훈 외, 강판으로 접합된 프리스트레스트 콘크리트보의 구조성능 평가를 위한 실험연구, 한국방재학회논문집, 제10권, 제5호, 2010
7. 이경훈 외, Mock-up 실험을 통한 MPS보의 안전성 및 경제성 평가에 관한 연구. 한국방재학회 2009년도학술발표대회논문집, 2009
8. 신현묵, 프리스트레스트 콘크리트 10판. 동명사,

2009
9. Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Design Handbook 5th Edition, 2009
10. ASTM Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete

(논문투고일 : 2011.05.09, 심사완료일 : 2011.08.05, 게재확정일 : 2011.08.22)

부록 : 기호정리

A_o : 가정된 파괴면의 면적
A_p : PC강연선의 단면적
A_b : 스터드볼트의 단면적
C_w, C_t, C_c : 각각 그룹 폭, 부재두께, 부재 모서리효과 근접성에 대한 보정계수 ($C_w = 1 + b/3.5d_e \le n_s, C_t = h/1.3d_e \le 1.0, C_c = 0.4 + 0.7d_c/d_e \le 1.0$)
E_c : 현장타설 콘크리트의 탄성계수
E_{ci} : 프리스트레싱 도입 시 콘크리트의 탄성계수
E_{pc} : 프리스트레스트 콘크리트의 탄성계수
E_{ps} : 강연선의 탄성계수
E_s : 철근의 탄성계수
E_{ss} : 강재의 탄성계수
F_y : 강재의 항복강도
P_c : 콘크리트의 압축강도
P_H : 수직하중에 의하여 보 내부에서 발생하는 수평우력성분
P_s : 스터드볼트의 인장강도
P_u : 계수 축하중
V_c : 콘크리트의 전단강도
V'_c : 후열에서 단독 스터드볼트의 전단강도
V_{sn} : 스터드볼트 1개의 전단강도
V_u : 계수 전단하중
V_y : 스터드볼트의 전단강도
a : 콘크리트 압축블럭깊이
d : 콘크리트 보 유효춤
d_e : 콘크리트의 자유단 단부로부터 스터드볼트의 후열까지 하중방향으로의 거리
d_h : 스터드볼트 헤드 직경
d_p : 보 상부에서 PC강연선 중심까지의 거리
e : 고력볼트 중심에서 강판단부까지의 편심거리
h : 우력의 중심거리
f_{ci} : 프리스트레싱 도입 시 콘크리트 설계압축강도
f_{ck} : 콘크리트 설계압축강도
f_{pc} : 프리스트레스트 콘크리트의 설계압축강도
f_{ps} : PC강연선의 유효인장강도
f_{pu} : 강연선의 인장강도
f_y : 철근의 항복강도
f_{ys} : 스터드볼트의 인장강도
l_e : 스터드볼트의 유효길이
n : 스터드볼트의 갯수
λ : 경량콘크리트 계수