Perfobond Rib을 적용한 강-PSC 혼합구조 연결부의 거동 평가

Behaviors of Joints with Perfobond Rib Shear Connectors in Steel-PSC Hybrid System

김 상 효[1] · 이 찬 구[2] · 윤 지 현[3] · 원 정 훈[4]†

Kim, Sang Hyo Lee, Chan Goo Yoon, Ji Hyun Won, Jeong Hun

요 약 : 본 연구는 강-프리스트레스 콘크리트(PSC) 혼합구조 보를 분절형 교량에 적용하기 위해 필수적으로 요구되는 이종 부재간의 연결에 대한 기초연구로써, 연결부 거동과 시공성을 향상시키기 위해 연결부 상·하부 플레이트에 perfobond rib 전단연결재를 설치한 강-PSC 연결부를 제안하였다. 제안된 연결부가 설치된 보 실험체들을 제작하여 하중재하실험을 통해 연결부의 성능을 확인한 결과, 모든 실험체에서 연결부의 파괴 없이 연결부 인접 PSC부에서 실험체의 파괴와 극한강도가 나타났다. 합성 작용에 의하여 실험체의 초기 강성은 우수한 것으로 나타났으며, 균열의 진전 형상도 전형적인 휨 균열 형상을 나타내었다. 또한, 기존 스터드를 적용한 실험체 이상의 강도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그러므로 제안된 연결부는 혼합구조 연결부에 효과적으로 적용 가능하다고 판단된다.

ABSTRACT : This paper studies the behavior of joints in steel-PSC (prestressed concrete) hybrid beams, which is necessary for the application of hybrid beams to spliced girder bridges, and proposes a new type of joint with improved construction convenience and structural behavior. In the proposed joint, perfobond rib shear connectors are attached to the upper and lower plates, which are expanded from the steel girders and located between the steel girder and the PSC girder. The experimental tests were performed on hybrid beams with the suggested joint. The results showed that all the beams had similar ultimate strengths and failure modes, due to the failure of their PSC parts. The composite action of the perfobond ribs was verified by examining the initial stiffness and cracks of the test beams. In addition, the test beams showed a higher degree of ultimate strength than the beams with stud shear connectors in the joints that had been previously studied. Thus, the proposed joint is effective for the steel-PSC hybrid beam.

핵 심 용 어 : 혼합구조 보, perfobond rib, 강-PSC 연결부, 하중재하실험

KEYWORDS : hybrid beam, perfobond rib, steel-PSC joints, experimental test

1. 서 론

최근 강과 콘크리트의 재료적 장점을 최대한 활용하면서 각 재료가 갖는 단점을 보완하여 단일재료로는 얻을 수 없는 우수한 구조특성을 만들어내는 혼합구조에 대한 관심이 증가되고 있다. 혼합구조는 사장교나 엑스트라도즈드교 등의 장대교에 주로 적용되고 있으며, 강 거더와 PSC 거더를 운반 가능한 크기로 공장 제작하여 현장으로 운반 후 연결하여 가설하는 분절형 교량(spliced girder bridge)의 형태로도 적용될 수 있다. 분절형 교량에 혼합구조가 적용될 경우, 운송 등의 제한조건을 해결함과 동시에 현장작업을 최소화할 수 있으므로 분절형 혼합구조 교량은 경제적인 교량 형식으로 제시될 수 있다.

혼합구조를 분절형 교량에 적용하기 위해 가장 먼저 필수적으로 선행되어야 하는 것은 이종 부재간의 연결 방법에 대한 연구이다. 해석적인 측면에서, 혼합구조에 대한 연구들은 연결부 경계면의 모형화 방법에 대해 중점을 두어 왔으며, 다양한 방법을 적용하여 연결부를 고려한 비선형 해석을 수행하였다(Matsuishi 등, 1985; Zimmerman, 1993; 심현섭, 2007; 윤익중 등, 2008). 실 교량 적용 측면에서, 연결부의

1) 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수(sanghyo@yonsei.ac.kr)
2) 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정 GS건설 기술본부 토목구조팀 차장(cglee@gsconst.co.kr)
3) 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정(yedjh@korea.com)
4) 교신저자. 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사후 연구원 (Tel. 02-2123-2804, Fax. 02-313-2804, E-mail : wjh0611@yonsei.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

효율성과 구조적 성능을 향상시키기 위해 다양한 형태의 연결부가 제안되어 실험을 통해 제안 연결부의 성능이 검증되었다. Hino 등(1985)은 연결부로 앵커 바를 적용한 경우, 스터드를 적용한 경우, 고장력 볼트를 적용한 경우의 3가지 연결부를 강재-PSC 연결과 강재-RC 연결에 적용하여 보 실험을 수행하였으며, Dunai 등(1996)은 end-plate 형태의 강재-콘크리트 연결부에 대해 실험을 수행하였다.

최근 국내에서도 강-PSC 혼합구조에 대한 연구가 증가하고 있다. 김광수 등(2008)은 강-PSC 구조의 연결부로 스터드 적용한 경우와 용접 철근을 적용한 경우에 대해 정적 재하실험을 수행하였으며, 노병철 등(2007)과 윤익중 등(2008)은 혼합구조 장대교의 연결에 적용되는 스터드를 갖는 전·후면판 공용 방식 연결부로 이루어진 강-PSC 혼합구조 보의 휨 및 전단 거동 실험을 수행하였다.

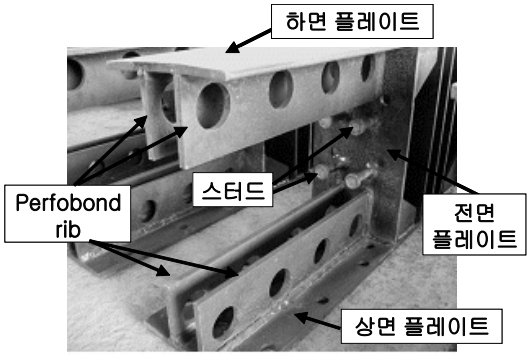
국내·외 기존 연구는 연성 전단연결재인 스터드를 적용한 연결부를 대상으로, 단면이 큰 복합 사장교나 엑스트라도즈드교에 적용을 주로 목표로 하고 있다. 그러므로 필요 스터드 개수를 배치할 수 있는 충분한 공간이 확보되며 시공시 스터드 배치에 큰 어려움은 발생하지 않는다. I형 강 거더와 I형 PSC 거더의 연결을 대상으로 하는 분절형 혼합구조 보의 경우, 연결부는 텐던의 정착에 필요한 크기의 직사각형 단면으로 구성되므로 상대적으로 제한된 연결부 단면 내에 설치되는 스터드의 개수가 과다하게 되어 스터드의 용접과 배근 등의 시공성에 문제점이 발생하게 된다. 또한, 최근의 스터드를 적용한 연결부를 갖는 혼합구조 보의 휨 실험결과에 의하면, 연결부 내에 적절한 배근이 이루어지지 않을 경우 연결부에 심각한 균열이 발생하여 혼합구조 보의 강도 및 파괴모드가 영향을 받을 수 있는 것으로 나타났다(윤지현 등, 2008).

따라서, I형 강 거더와 I형 PSC 거더를 현장에서 연결하여 가설하는 분절형 혼합구조 보의 연결부를 개발하는 것을 목적으로 하는 본 연구에서는 기존 스터드 연결방법의 문제점을 개선하기 위해 최근 연구되고 있는 강성 전단연결재인 perfobond rib을 적용한 새로운 형태의 연결부를 제안하였다. Perfobond rib의 적용으로 인해 시공성의 증진과 함께 스터드 전단연결재가 가지는 근본적인 문제점인 피로문제를 개선할 수 있으며(Oguejifor와 Hosain, 1995), 또한 추가적인 연결부 단면 강성의 증가도 기대할 수 있다. 제안 연결부의 구조적 성능과 혼합구조보의 거동을 검증하기 위해 보 실험체를 제작하여 파괴실험을 수행하여 결과를 분석하였으며, 또한 스터드로 이루어진 연결부를 갖는 실험체에 대한 기존의 휨 실험 결과와 비교하였다.

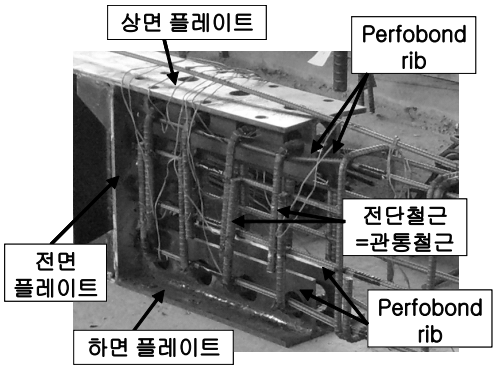
2. 강-PSC 연결부 제안

일반적으로 강 거더와 PSC 거더의 연결부는 각 부재에서 발생되는 휨응력과 전단응력 등을 원활하게 전달하여야 하며, 연결부의 파괴가 전체 구조물의 파괴를 유도하지 않도록 설계되어야 한다. 강-콘크리트 연결을 위해 주로 적용되는 방법은 스터드에 의한 접합 방법으로 강판에 용접된 스터드의 전단 저항력으로 휨과 전단력을 전달하는 방법이다.

본 연구에서 제안한 연결부는 그림 1과 같이 강성 전단연결재인 perfobond rib을 적용한 방법으로, 강 거더로부터 연속적으로 설치된 연결부 상·하부 플레이트에 perfobond rib 전단연결재를 용접 연결하는 것이다. 상·하부 플레이트에 설치된 perfobond rib는 휨에 저항하여 휨응력을 전달한다. 연결부 상·하부 플레이트는 강형부 상·하부 플레이트와 일체로 제작되며, 콘크리트 타설을 위해 상면 플레이트에는 다수의 홀이 설치된다. Perfobond rib 전단연결재의 관통철근으로는 연결부 내에 설치될 전단철근을 사용한다. 또한, 연결부 전면 플레이트에는 전단력에 저항할 수 있도록 스터드가 배치된다.



(a) 철근 배근 전(상·하부 바뀐 형상)



(b) 철근 배근 후

그림 1. Perfobond rib을 이용한 강-PSC 연결부 제안

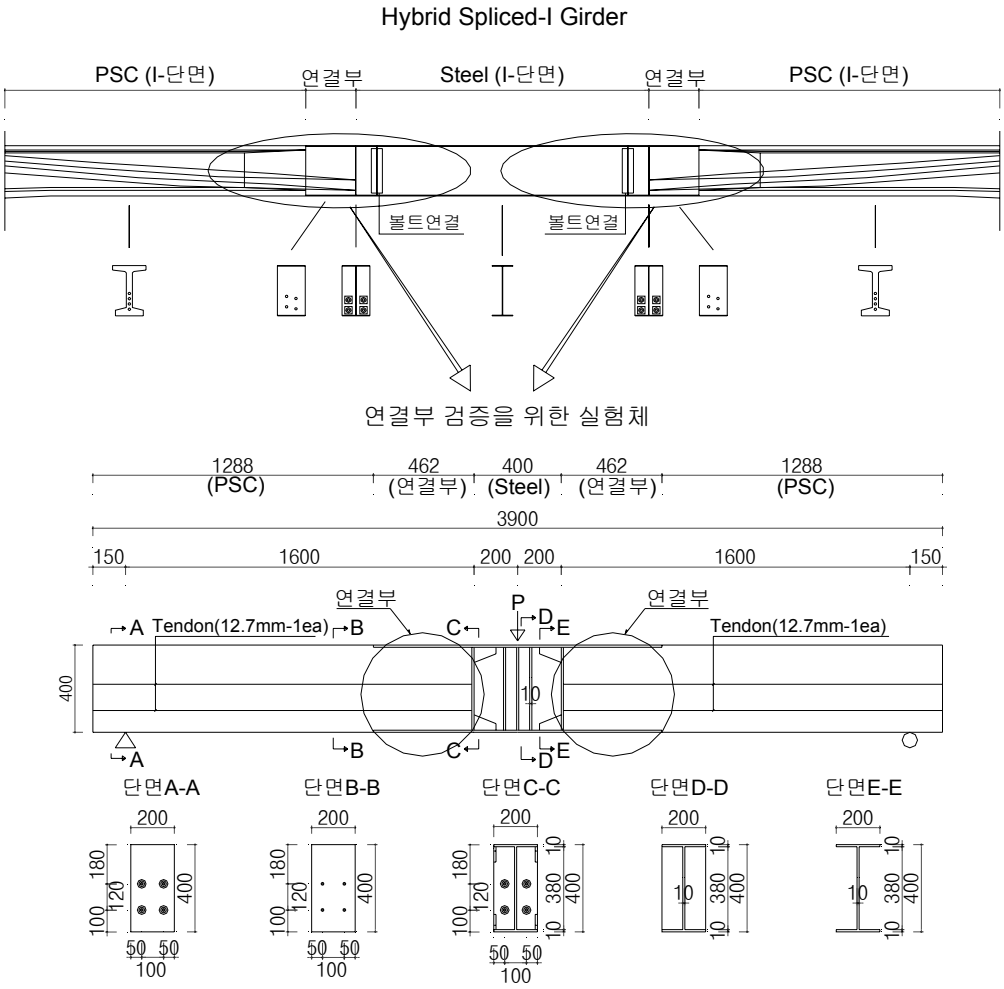


그림 2. 연결부 실험체 개략도 (단위: mm)

3. 실험체 설계

분절형 혼합구조 보에 제안된 연결부의 적용성을 평가하기 위해, 축소 모형실험을 수행하였다. 실제 분절형 복합구조 교량은 그림 2에 보인 바와 같이 PSC-I 거더와 Steel-I 거더, 그리고 연결부로 구성되어 있다. 축소 모형실험은 제안 연결부의 성능 검증을 목적으로 하므로 축소 모형실험체의 단면은 연결부가 PS강재의 정착을 위해 직사각형 단면으로 이루어진 것을 참고하여 연결부와 PSC 단면은 직사각형으로 강형은 I형으로 구성되었다(그림 2).

실험에 사용된 실험체는 길이 3.9m(지간 거리 3.6m)이며, 실험체의 중간에는 I형 강형부를, 지점부에는 PSC 거더를, 강형부와 PSC부 사이에 연결부를 배치하였다. 강형부는 일반적으로 그 거동특성이 명확하게 알려져 있으며, 본 실험은 연결부의 거동특성에 관심을 두고 있으므로, 강형부의 길이를 짧게 설치하였다. 또한, 충분한 강도를 갖도록 강형부를 설계하였다.

연결부에는 제안 방법인 perfobond rib 전단연결재가 설치되며, 관통철근으로 전단철근이 배치된다. PSC부는 콘크리트와 PS 강재로 구성되어 있으며, 1가닥의 SWPC7B 12.7mm의 강연선 4개가 단면 내에 설치되어 지점부와 강형부 인접 연결부 끝단에서 정착 후 지점부에서 긴장되었다. 또한, 연결부 끝단의 종방향 철근은 연결부 전면 플레이트에 용접된다.

Perfobond rib 전단연결재는 허용응력 설계법을 근거로 설계되며, 또한 강도 설계법도 만족하도록 설계되었다. 극한강도는 Oguejiofor와 Hosain (1997)과 강균희(2006), 김상효 등(2009)의 연구결과를 근거로 다음과 같은 극한 강도식을 이용하여 평가되었다.

$$Q_u = 4.50\,h\,t\,f_c' + 0.91\,A_{tr}\,f_y + 3.31\,n\,d^2\sqrt{f_c'} \qquad (1)$$

여기서, Q_u는 perfobond rib 전단연결재 1개의 극한 전단

강도(N)이며, h는 rib의 높이(mm), t는 rib의 두께(mm)이다. f_c'은 콘크리트의 압축강도(MPa), A_{tr}은 횡방향 관통철근의 총 단면적(mm^2), f_y는 철근의 항복강도(MPa), n은 리브 홀의 수, 그리고 d는 리브 홀의 지름(mm)이다.

허용응력 설계법을 적용하기 위해 전단연결재의 허용력을 산정하여야 하나, 대부분의 국외 설계기준의 경우 강도설계법을 따라 전단연결재가 설계되며, 국내의 경우 perfobond rib에 대한 설계기준이 제시되어 있지 않으므로 perfobond rib 전단연결재의 허용 전단력은 정의되어 있지 않다. 국내 설계기준에서 제시된 연성 전단연결재인 스터드의 허용력은 극한 강도의 1/6수준으로 정의되어 있으나, 강성 전단연결재인 perfobond rib의 허용력을 같은 수준으로 정의하는 것은 합리적이지 않다고 판단된다.

본 연구에서는 합리적인 수준의 허용력을 결정하기 위해 push-out 실험에 의한 하중-상대변위 곡선의 항복강도를 안전율 3으로 나누는 방법을 적용하였다. 일반적인 강재의 허용응력이 항복강도를 안전율 1.7로 나누어 정의되는 것을 참고로 한다면, 전단연결재의 중요성을 고려하여 안전율 3을 설정한 것은 타당하다고 생각된다. 본 연구에서 적용하는 고강도 콘크리트(50MPa)내에 설치된 perfobond rib의 push-out 실험에 대한 하중-상대변위 곡선(김상효 등, 2009)을 분석할 경우, 항복강도는 극한강도의 75% 수준이 적용가능 할 것으로 판단되었다. 따라서, 본 연구에서 perfobond rib의 허용력은 극한강도의 1/4 수준 (=0.75×1/3)으로 결정되었다.

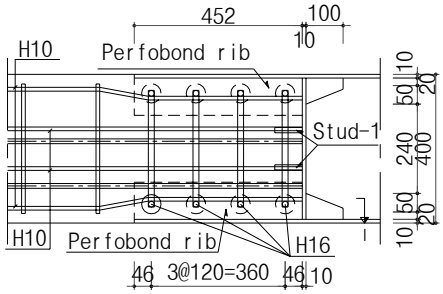
실험체에 적용된 perfobond rib 전단연결재는 2개가 상·하부 플레이트에 각각 평행하게 병렬로 설치되는 Π형의 형태를 갖는다. 병렬 설치의 경우, 관통 철근의 공유 등에 의해 개별 강도가 완전히 발현되지 않는다. Push-out 실험결과에 따르면, 병렬 배치일 경우 단독 배치에 비해 극한강도가 20% 감소되므로(김상효 등, 2009), 이를 반영하여 적용식 (1)에서 구한 극한강도의 80%를 perfobond rib 한 개의 극한강도로 평가하였다.

연결부에 발생하는 휨 모멘트를 전달하는 perfobond rib 전단연결재의 설계절차를 정리하면 다음과 같다.

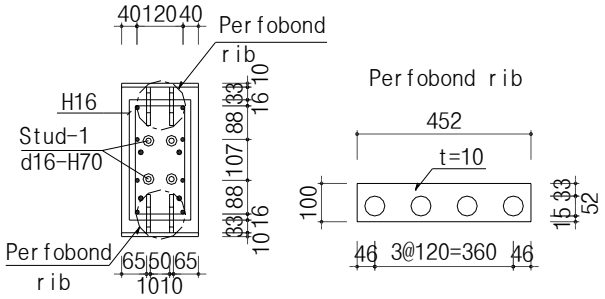
1) 연결부에 발생하는 사용하중 상태에서의 휨모멘트를 perfobond rib에 작용하는 압축력과 인장력의 우력으로 환산한다. 적용 perfobond rib의 개수와 제원을 가정한다.
2) Π형 perfobond rib 전단연결재에 대한 push-out 실험결과로부터 얻은 perfobond rib의 병렬배치로 인한 강도 감소를 반영하여 극한강도(식 (1))의 80%를 perfobond rib 한 개의 극한강도로 평가한다.
3) 2)에서 평가한 극한강도의 1/4 수준의 perfobond rib 전단연결재 개당 허용력을 산정하고, 필요 압축력과 인장력에 저항할 수 있는 perfobond rib 전단연결재의 소요 개수와 필요 제원을 검토한다.
4) 산정된 제원에 대해 단계 2)에서 설정한 극한강도를 이용하여 강도 조합 상태에서의 휨모멘트에 의한 압축력과 인장력을 검토한다.

실험체의 전면 플레이트에는 연결부 전단력 전달을 위해 stud 4개를 배치하였다. 연결부 전면 플레이트에 설치되는 stud의 개수는 연결부가 전달하는 전단력에 대해 도로교 설계기준(2005)에서 제시한 규정을 따라 허용응력법과 강도설계법으로 필요 개수가 결정되었다.

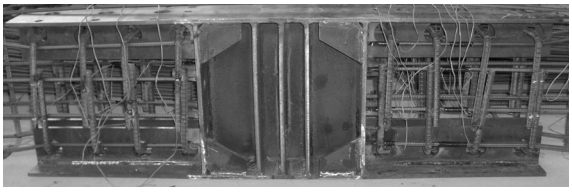
설계된 연결부 상세는 그림 3과 같다. Perfobond rib 전단연결재는 길이 452mm, 높이 100mm, 두께 10mm인 SS400강재가 적용되었다. 직경 52mm인 홀 4개가 설치되며, 전단철근으로 설치되는 H16 철근이 홀을 관통한다. 전면 플레이트에는 직경 16mm, 높이 70mm의 stud가 4개 용접되었다.



(a) 연결부 측면도



(b) 연결부 단면 및 Perfobond rib 상세



(c) 제작된 연결부 형상

그림 3. 실험체 연결부 상세 (단위: mm)

PSC부 콘크리트의 설계강도는 50MPa이며, 강형부의 강재는 SS400강재가 적용되었다. 철근은 SD40의 고강도 철근을 사용하였으며, 극한강도 1900MPa인 PS 강재를 사용하여 연결부를 긴장하였다.

제작된 실험체 제원을 요약하면 표 1과 같다. 동일한 제원의 실험체가 3개 제작되었으며, 하중재하시 2개의 실험체는 반복하중 없이 하중 또는 변위를 실험체가 파괴될 때까지 증가시켰으며(PR-ST-4-1, PR-ST-4-2), 1개의 실험체에 대해서는 반복하중을 재하하였다(PR-RE-4). 반복하중의 경우, 150kN에서 하중을 천천히 제거한 후 50kN에서 다시 하중을 재하하며, 재하된 하중이 180kN에 도달하였을 때 다시 하중을 제거하여 50kN에 도달할 때 하중을 다시 증가시켜 파괴시까지 재하하였다.

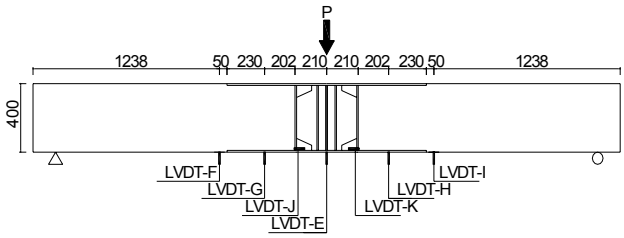
표 1 실험체 제원

길이	3.9m(지간거리 3.6m) (PSC+연결부+Steel+연결부+PSC =1.288+0.462+0.4+0.462+1.288m)				
PSC 단면	200mm × 400mm				
강형 단면	I-section (B=200mm, H=400mm, T=10mm)				
연결부	200mm × 400mm (상·하부 플레이트 두께=10mm)				
Perfobond rib	길이	높이	두께	홀	
				직경	개수
	452mm	100mm	10mm	52mm	4
관통철근	H16				
스터드	D(직경)=16mm, H(높이)=70mm				
강재	SS400				
철근	SD40				
PS강재	SWPC7B 12.7mm(f_{pu}=1900MPa)				
콘크리트	f_{ck}=50MPa				

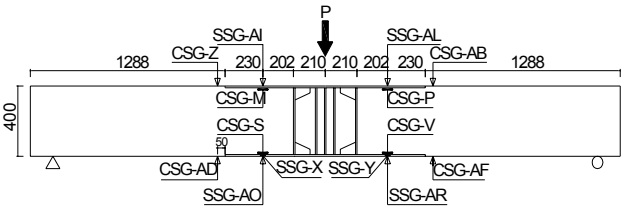
4. 하중재하 실험

강-PSC 혼합구조 보 실험체의 변위와 변형률을 측정하기 위해 실험체 중앙, 연결부, PSC부에 변위계를 설치하였으며, 연결부 및 PSC부의 상·하면과 측면에 변형률 게이지를 설치하였다. 또한, 콘크리트 타설 전에 철근에 변형률게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였다. 변위계의 설치 위치는 그림 4(a)와 같으며, LVDT-E~I는 각 부분의 수직변위를 LVDT-J~K는 콘크리트와 강재의 상대변위를 측정하기 위하여 설치되었다. 실험체의 상·하면과 측면에 설치된 게이지(그림 4(b))는 설치위치에 따라 강재의 경우 SSG-, 콘크리트의 경우 CSG-로 나타내었으며, 철근에 설치된 변형률게이지의 경우(그림 4(c)), 위치에 따라 SSG-AT~BQ로 나타내었다.

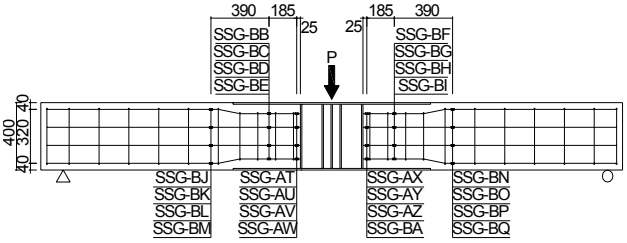
하중재하실험은 유압식 가력장비(actuator)를 이용하였다. 연결부는 휨 모멘트 및 전단력을 전달하여야 하므로, 휨과 전단력이 연결부에서 동시에 발생할 수 있도록 양단이 힌지와 롤러로 단순지지되며 실험체의 중앙점에 하중을 재하하는 3점 휨 실험을 수행하였다(그림 5).



(a) 변위계



(b) 측면, 상면, 하면 변형률 게이지



(c) 철근 변형률 게이지

그림 4. 측정 위치 (단위: mm)

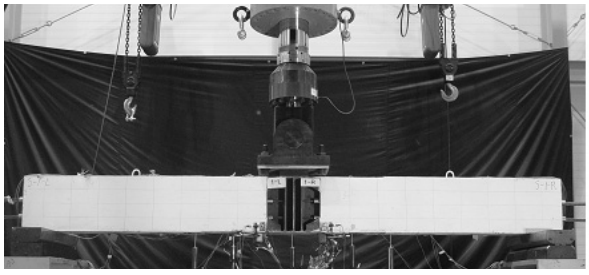


그림 5. 하중재하실험 전경

5. 실험 결과

5.1 파괴 형상

실험체의 하중의 증가에 따른 균열 형상과 파괴시 형상을 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 모든 실험체에서 초기 균열은 PSC부와 연결부의 경계면에서 발생하였다. 하중의 증가에 따라 휨 균열이 진전되는 형상을 보이며, 단면의 휨 저항능력이 가장 작은 PSC와 연결부 경계면의 하면 인장파괴와 상면의 압축파괴에 의해 실험체가 파괴되는 것을 알 수 있다(그림 7). 그러므로 제안된 연결부가 충분한 강도와 강성을 가지고 PSC부의 파괴로 구조물 전체의 파괴가 유도되도록 설계되었으므로 본 연구에서 적용한 설계방법과 제안 연결부는 강-PSC 혼합구조에 충분히 유효하게 적용되었다고 판단된다.

실험체 계획은 좌·우측이 동일하게 계획되어 있으나, 실험체를 제작함에 있어 좌·우를 이상적으로 동일하게 제작하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그 결과 실험체의 좌·우측에서 상대적으로 약한 부분이 먼저 파괴에 도달하게 되므로 PR-ST-4-1과 PR-RE-4 실험체는 우측의 파괴에 의해, PR-ST-4-2 실험체는 좌측의 파괴에 의해 보가 파괴되었음을 그림으로부터 알 수 있다.

5.2 하중-처짐 관계

실험체의 하중-처짐 관계를 측정하였으며, 보 중앙에서의 하중-처짐 곡선을 그림 8에, 좌측과 우측 연결부에서의 하중-처짐 곡선을 그림 9에, 연결부 인접 PSC부에서의 하중-처짐 곡선을 그림 10에 나타내었다. 모든 그림에서 하중증가에 따른 하중-처짐 관계는 0~70kN의 탄성영역 내에서 선형거동을 나타내고, 탄성한계(70kN)를 초과함에 따라 비선형 거동을 나타내며, 항복이후의 변위는 급속하게 증가되는 것을 알 수 있다. 세 개의 실험체 중에서 PR-ST-4-1 실험체가 상대적으로 먼저 파괴에 도달하였으며, 반복하중을 재하한 실험체(PR-RE-4)의 하중-변위곡선은 반복하중이 재하되지 않은 실험체와 유사한 거동을 나타낸다. 또한, 반복하중이 재하된 실험체로부터 항복이후의 영구변형을 확인할 수 있으며, 항복이 진행될수록 하중제거 후 하중재하시의 강성이 작아짐을 알 수 있다.

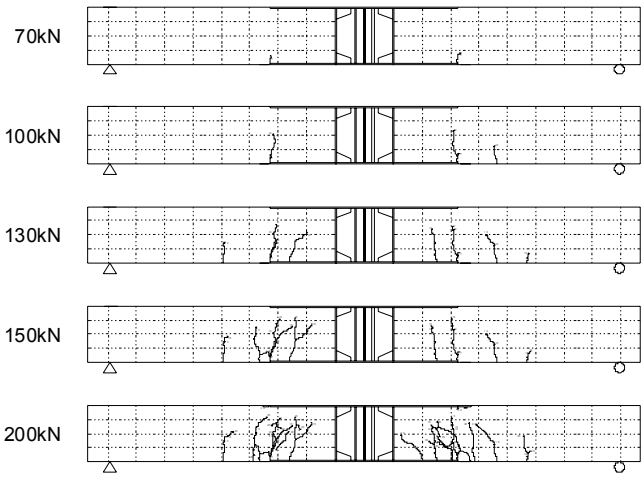
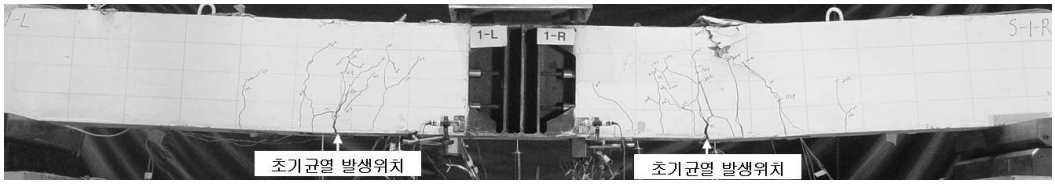
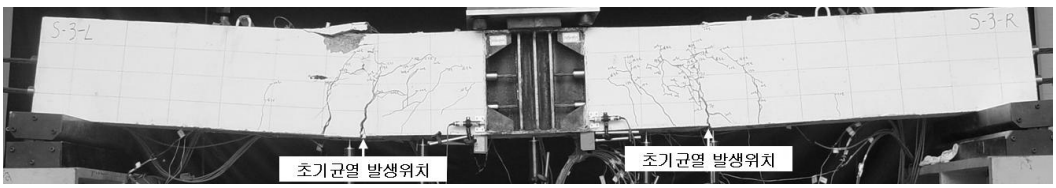


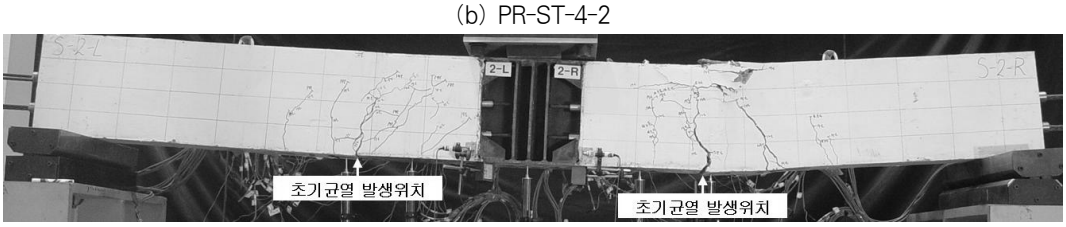
그림 6. 균열도(PR-ST-4-1)



(a) PR-ST-4-1



(b) PR-ST-4-2



(c) PR-RE-4

그림 7. 파괴 형상

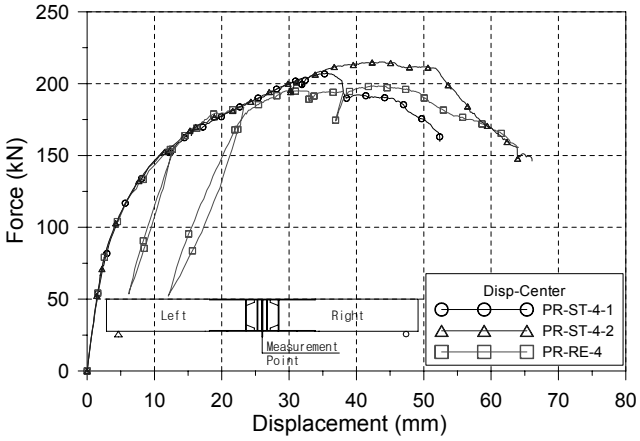
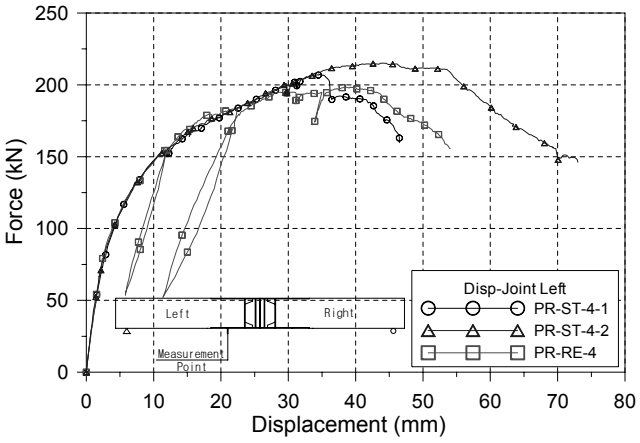
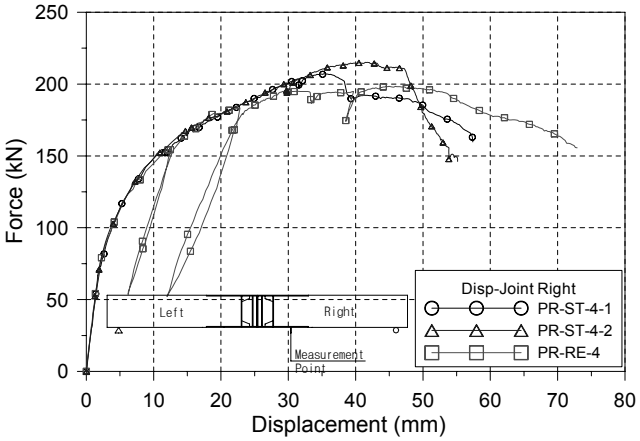


그림 8. 실험체 중앙에서의 하중-처짐 관계

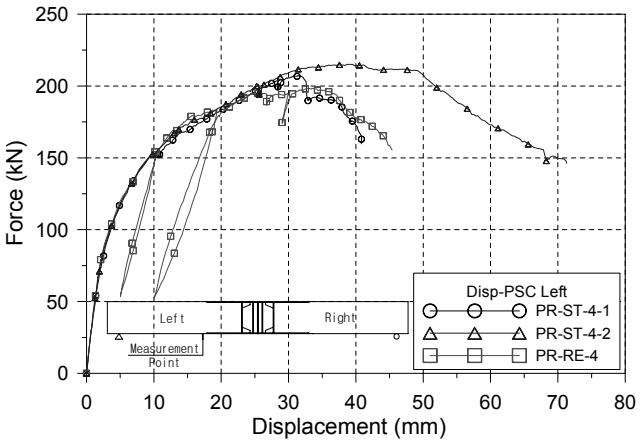


(a) 좌측 연결부

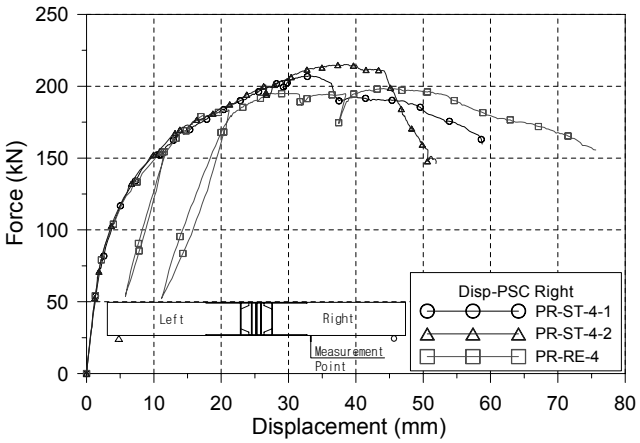


(b) 우측 연결부

그림 9. 연결부에서의 하중-처짐 관계



(a) 좌측 PSC부



(b) 우측 PCS부

그림 10. 연결부 인접 PSC부에서의 하중-처짐 관계

실험체 중앙부에서의 하중-변위관계로부터 구한 극한하중을 이용하여 PSC단면의 실험에 의한 극한모멘트와 이론에 의한 값을 비교하였으며, 결과를 표 2에 나타내었다. 여기서 P_u와 M_u는 각각 실험에 의한 극한 하중과 극한한중에 의해 연결부와 PSC부 경계면 단면에서 발생한 극한 모멘트이며, $\overline{M_u}$는 도로교설계기준(2005)에 근거하여 계산된 연결부와 PSC 경계면에서의 PSC 단면의 극한 모멘트이다.

표 2 실험체의 극한하중과 예측 극한모멘트

실험체	극한 하중	극한 모멘트		
	실험값		예측값	$\frac{M_u}{\overline{M_u}}$
	P_u(kN)	M_u(kNm)	$\overline{M_u}$(kNm)	
PR-ST-4-1	207.2	117.9	109.9	1.07
PR-ST-4-2	215.2	122.4		1.11
PR-RE-4	198.4	112.9		1.03
평 균	206.9	117.7	109.9	1.07

실험으로부터 구한 극한강도는 PSC 단면의 예측 극한강도와 유사하므로 모든 실험체의 PSC부가 전체 부재의 휨강도를 지배한 것을 확인할 수 있다. 그러므로 실험체에 적용된 perfobond rib 전단연결재가 연결부 내에서 충분히 역할을 수행하며 제안 연결부가 효과적으로 적용됨을 알 수 있다.

강성 전단연결재의 적용으로 인한 연성능력 부족 여부를 검토하기 위해 실험체의 연성도를 평가하였다. 연성비는 그림 11과 같은 방법으로 항복점(δ_y, P_y)과 극한점(δ_u, P_u)을 평가한 후 극한변위를 항복변위로 나누어 평가하였다(홍성걸 등, 2007). 항복점을 평가하기 위해서 원점과 극한하중의 1/3되는 점을 연결한 선분 (a)와 x축이 이루는 각의 1/3되는 선분 (b)를 원점에서 그린 후, 실험값과 외접하도록 평행이동시켜 선분 (c)를 작성하였다. 선분 (a)와 선분 (c)가 만나는 점을 항복강도로 평가한 후, 이에 대응하는 항복변위를 산출하였다. 각 실험체 중앙에서의 하중-변위관계로부터 구한 항복점과 극한점, 연성도 평가 결과는 표 3과 같으며, 평균 연성도는 4.21로 평가되었다. 일반적으로 3~5사이의 연성비는 구조물의 붕괴 전에 충분한 신호를 줄 수 있는 최소의 연성비로 인식되므로(Ashour, 2000; Teo 등, 2006) 연성능력 측면에서도 제안된 연결부를 갖는 혼합구조보는 문제가 없는 것으로 판단된다.

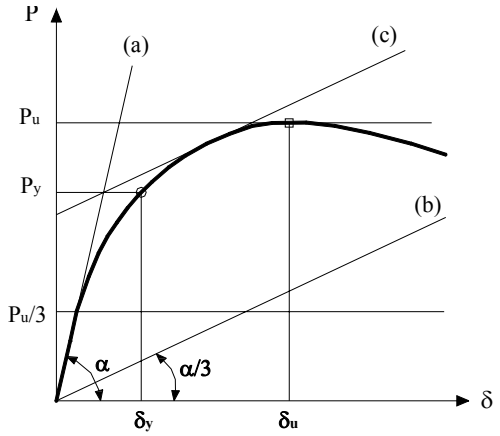


그림 11. 연성도 계산시 항복점 평가방법

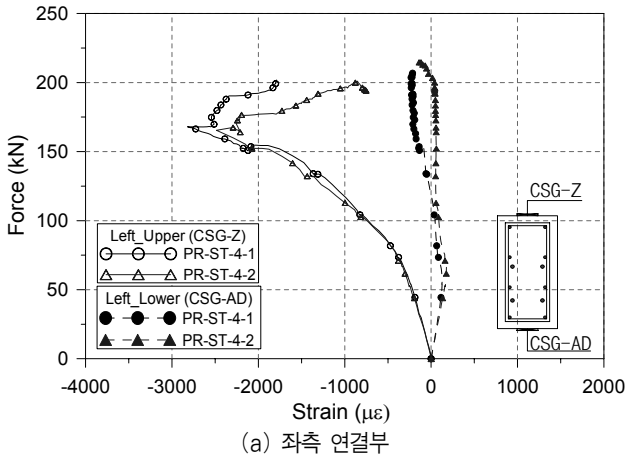
표 3 연성도 평가

실험체	항복점		극한점		연성도 (δ_u/δ_y)
	하중 (kN)	변위(δ_y) (mm)	하중 (kN)	변위(δ_u) (mm)	
PR-ST-4-1	142.10	9.19	207.2	35.46	3.86
PR-ST-4-2	142.93	9.40	215.2	43.80	4.66
PR-RE-4	145.90	10.52	198.4	43.27	4.11
평 균	143.64	9.70	206.9	40.84	4.21

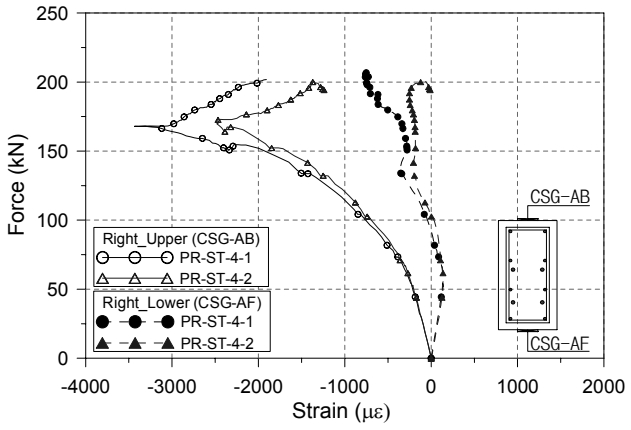
5.3 하중-변형률 관계

파괴형상 분석결과, 연결부 인접 PSC부의 휨 파괴에 의해 실험체가 파괴된 것으로 나타났으므로 먼저 하중증가에 따른 연결부 인접 PSC부의 변형률 이력을 분석하였다. 그림 12는 좌측 연결부와 우측 연결부에 인접한 PSC부의 상·하면 변형률을 나타낸다. 균열 발생 이전까지는 하중이 증가함에 따라 PSC부의 상면은 압축영역, 하면은 인장영역으로 선형 변형률 분포를 나타내며, 좌측의 경우 균열하중은 56kN (PR-ST-4-1)과 52kN (PR-ST-4-2)으로 측정되었다. 우측에서 측정된 균열하중은 56kN (PR-ST-4-1)과 67kN (PR-ST-4-2)이었다.

균열하중을 넘어서부터 상면의 압축변형률은 비선형 변형률 분포를 나타내고, 170kN에 이르렀을 때 압축변형률이 급격하게 감소한다. 이는 PSC부에 접하는 연결부 끝단의 압축영역에서 응력집중현상에 의한 균열 및 부분 파손이 나타났기 때문이다. 하면의 인장변형률은 균열하중이 초과되면서 점차 감소하여 더 이상 하중에 저항할 수 없게 된다.



(a) 좌측 연결부



(b) 우측 연결부

그림 12. 연결부 인접 PSC 단면의 상·하부 변형률

좌측과 우측 연결부 중앙에서의 측면 및 상·하면 변형률을 비교하여 각각 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 하중의 증가에 따라 상부 콘크리트의 압축 변형률은 증가하나, PSC부와는 달리 콘크리트의 압축 파괴가 발생하지 않았다(그림 13의 CSG-M, 그림 14의 CSG-P). 하부 인장부 콘크리트의 경우, 약 125kN까지 인장응력에 저항하다가 이후 파괴된 것으로 보이며(그림 13의 CSG-S, 그림 14의 CSG-V), 상·하부 강재의 경우 항복변형률에 도달하지 않았음을 알 수 있다.

연결부 하부 플레이트의 측면 변형률과 콘크리트 하부 측면에서의 변형률은 균열하중이전까지는 거의 일치된 변형률 관계를 보이므로 혼합구조 보에 변형이 발생하더라도 강-PSC 연결부는 분리되거나 슬립현상이 거의 발생하지 않는 완전결합으로 거동한다는 것을 알 수 있다(그림 13의 SSG-X와 CSG-S, 그림 14의 SSG-Y와 CSG-V). 균열 이후, 콘크리트의 균열로 인해 인장 변형률에 차이가 생기므로 합성력은 저하되게 됨을 알 수 있다. 그러므로 균열발생 이전의 탄성설계 개념으로 제안 연결부를 설계한 본 연구의 방법론은 타당하다고 판단된다.

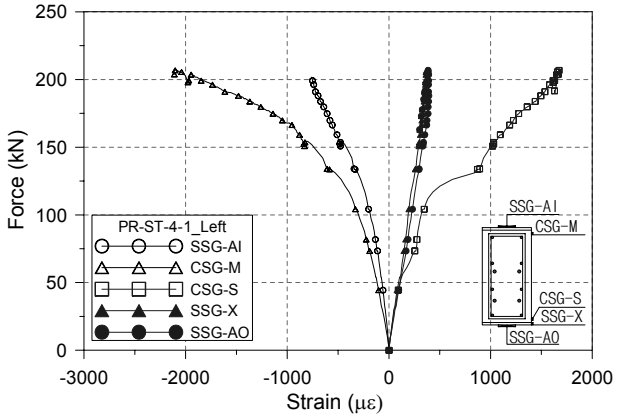


그림 13. 좌측 연결부 중앙에서의 변형률(PR-ST-4-1)

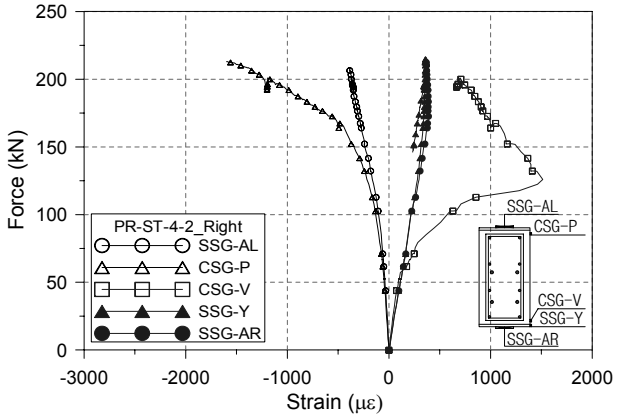
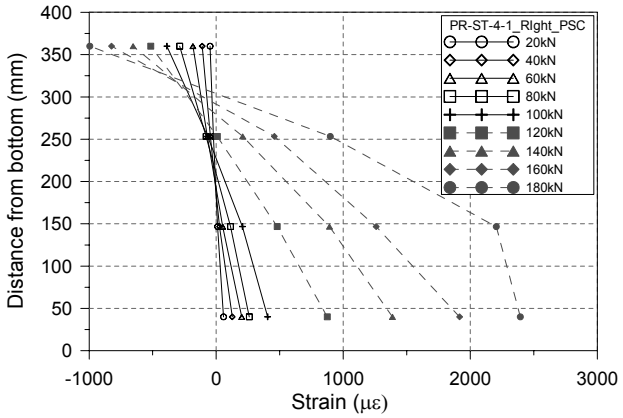
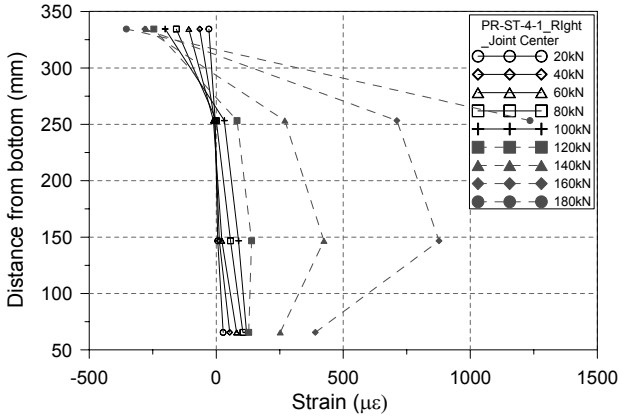


그림 14. 우측 연결부 중앙에서의 변형률(PR-ST-4-2)

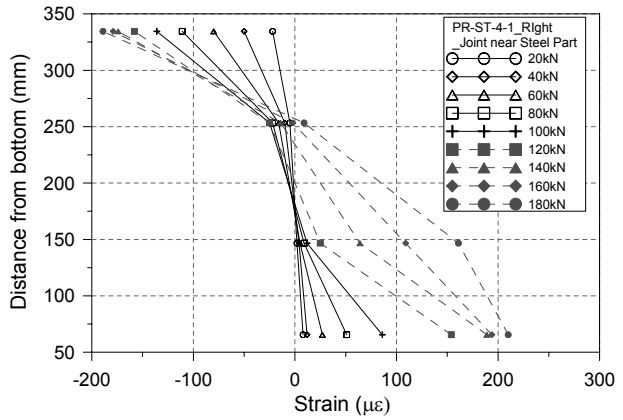
철근의 변형률로부터 하중의 증가에 따른 중립축 변화를 분석하기 위하여 특정 하중에 대한 철근의 변형률을 조사하였다. 보 파괴가 발생한 PR-ST-4-1 실험체 우측에 대해 연결부 인접 PSC부, 연결부 중앙부, 강형부 인접한 연결부 내부에서의 철근의 변형률을 그림 15에 나타내었다. 그림에서 세로축은 측정된 변형률의 위치를 나타내며, 단면 저면에서부터의 거리로 나타내었다.



(a) 연결부 인접 PSC부



(b) 연결부 중앙



(c) 강재부 인접 연결부

그림 15. 하중증가에 따른 중립축 변화 (PR-ST-4-1, 우측)

중립축의 변화를 보면, 연결부 인접 PSC부와 연결부 중앙의 경우, 균열이 발생한 이후인 60~80kN 범위에서 중립축이 상승하며(그림 16(a), (b)), 강형부 인접한 연결부 내부에서는 100~120kN에서 중립축이 상승한다(그림 16(c)). 각 부분에 발생된 부분의 변형률의 크기를 살펴보면, PSC부의 변형률이 가장 크며, 연결부 내측으로 갈수록 변형률이 작음을 알 수 있다. PSC부의 인장철근은 항복변형률로 추정되는 2000με을 넘어서며, 연결부 중앙에서도 일부 인장철근이 항복변형률을 넘어서나, 강재부 인접 연결부 내부의 철근의 경우, 모두 항복변형률 이내에 있다. 그러므로 perfobond rib과 콘크리트의 합성단면의 효과로 추가적인 강성 증가 효과를 얻음을 확인할 수 있다.

5.4 기존 결과와 비교

동일한 실험체 제원에 대해 perfobond rib 대신에 스터드를 이용한 연결부를 채택한 실험체의 중앙부 하중-변위 결과(윤지현 등, 2008)와 본 연구의 실험 결과를 비교하여 그림 16에 나타내었다. 기존의 연구 결과인 연결부에 스터드를 사용한 HS-ST-3과 HS-ST-4 실험체는 본 연구와 연결부 상세를 제외한 나머지 부분은 동일한 제원을 갖으며, 연결부 차이점은 표 4와 같다. 또한, ABAQUS 프로그램을 이용한 비선형 해석결과도 그림에 나타내었다. 비선형 해석에서 콘크리트는 3차원 솔리드 요소로, 강재는 쉘 요소로, PS 강연선은 트러스 요소로 모형화되었으며, 콘크리트의 비선형 재료특성은 concrete damaged plasticity 모형을, 강재는 bilinear의 plastic 모형을 적용하였다. 강과 콘크리트의 접합면은 contact 요소를 사용하였으며, 경계면 접선 거동 시 lagrange multiplier method와 마찰계수 0.7을 적용하였다.

균열 발생 전의 탄성영역 내에서는 모든 실험체는 거의 유사한 하중-처짐 관계를 보이나, 항복이후 극한강도에 도달하기 전까지의 강성은 본 연구에서 제안한 연결부를 갖는 실험체인 PR-ST-4-1, -2 실험체가 가장 큰 강성을 갖는 것으로 나타났다. 본 연구의 실험체와 동일한 전단철근량과 스터드를 적용한 실험체의 경우(HS-ST-4), 항복이후 강성은 본 연구의 실험체보다 떨어지나 극한강도는 유사하며, 연성능력은 보다 우수한 것으로 나타났다. 최소철근을 배근한 스터드를 적용한 실험체의 경우(HS-ST-3), 극한 하중-변위 능력이 가장 낮은 것으로 평가되었다. 본 연구의 실험결과는 비선형 해석결과보다 다소 안전측의 결과를 나타내는데, 이는 비선형 해석시 전단연결재인 perfobond rib의 강성기여를 무시하고 상부 플레이트와 콘크리트 사이를 contact 요소로 모형화하였기 때문이다. 또한, 강성의 기여도가 없는 스터드를 적용한 경우의 실험결과(HS-ST-4)는 비선형 해석결과와 유사한 것으로 나타났다.

따라서, 기존의 실험결과를 본 연구의 결과와 비교했을 때, 본 연구에서 제안한 perfobond rib로 이루어진 연결부를 갖는 실험체는 기존 스터드 전단연결재를 적용한 연결부를 갖는 실험체 이상의 강도를 얻을 수 있으며, 스터드를 적용한 경우에 비해 적은 연성능력은 5.2절에 검토한 바와 같이 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.

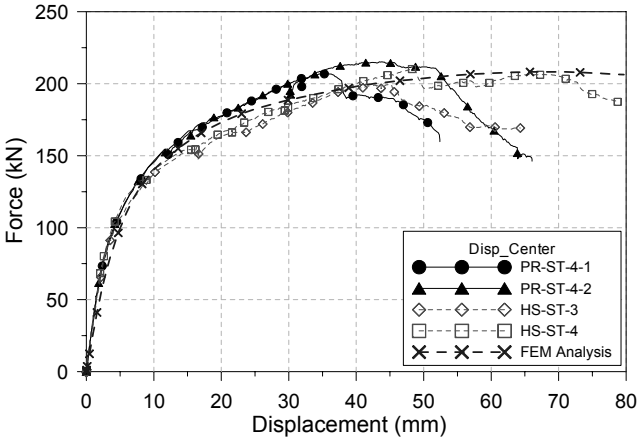


그림 16. 기존 실험결과 및 비선형 해석 결과와 비교

표 4 기존 연구의 실험체(윤지현 등, 2008)와 본 연구 실험체의 연결부 차이점

실험체	전단연결재 (상 · 하부 플레이트)	전단철근
본 연구 (PR-ST-4-1, -2)	Perfobond rib	H16-4ea
HS-ST-3	Stud	H10-3ea (최소 철근)
HS-ST-4	Stud	H16-4ea

6. 결 론

본 연구에서는 perfobond rib 전단연결재로 이루어진 연결부를 갖는 PSC-강-PSC 혼합구조보를 제작하여 보 실험을 통해 제안된 연결부와 혼합구조 보의 거동특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제안 방법을 적용한 혼합구조 보 실험체는 연결부 인접 PSC부의 휨 파괴에 의해 전체 보 실험체가 파괴되는 양상을 보였으며, 실험체의 극한강도는 PSC 단면의 예측 극한강도와 유사한 것으로 나타났다. 또한, 제안방법을

적용한 실험체는 스터드 전단연결재를 적용한 연결부를 갖는 실험체 이상의 강도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 연결부는 연결부의 파괴 없이 강-PSC 혼합구조 보에 효과적으로 적용될 수 있다고 판단된다.

(2) 균열하중까지 연결부의 강과 콘크리트는 분리되거나 슬립현상이 거의 발생하지 않는 완전결합으로 거동하며, 콘크리트에 균열이 발생된 후 합성력은 저하됨을 알 수 있다. 따라서 균열발생 이전의 탄성설계 개념으로 제안 연결부를 설계한 본 연구의 방법론은 타당하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 GS건설과 삼표이앤씨의 연구비 지원 및 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템 공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원으로 이루어진 것으로 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2005) **도로교설계기준**, 한국도로교통협회

강균희 (2006) **Perfobond 전단연결재의 거동에 관한 실험적 연구**, 석사학위 논문, 연세대학교

김광수, 정광회, 심정욱, 유성원 (2008) 프리스트레스트 콘크리트-강 혼합거더의 휨 실험 및 경계면 수평계수 분석, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제20권, 제2호, pp.231-237.

김상효, 안진희, 정치영, 최규태, 이찬구 (2009) 콘크리트 강도 변화와 2열 배치된 Perfobond rib 전단연결재의 극한강도 평가, **2009년 학술대회발표집**, 한국강구조학회, pp.3-4.

노병철, 조성용, 박현철, 김문겸 (2007) 전·후면판 공용방식 접합부를 갖는 강-PSC 혼합구조의 휨 및 전단거동, **한국구조물진단학회 논문집**, 한국구조물진단학회, 제11권, 제6호, pp.201-212.

심현섭 (2007) 전단스터드의 변형특성에 관한 유한요소해석-고강도 콘크리트를 사용한 합성보-, **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, 제19권, 제5호, pp.473-482.

윤익중, 노병철, 김문겸, 조성용 (2008) 혼합구조의 성능 향상을 위한 개선된 접합부의 개발 (II): 개선된 접합방식의 성능 확인을 위한 모형실험 및 해석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2A호, pp.207-214.

윤지현, 원정훈, 박세준, 김상효, 이찬구 (2008) 스터드 전단연결재를 적용한 강-PSC 복합구조 연결부의 거동에 관한 실험적 연구, **2008년 가을 학술발표논문집**, 한국구조물진단유지관리공학회, pp.349-353.

홍성걸, 양동현, 정종현, 임병호 (2007) 층고 절감을 위한 하이브리드 보의 휨 거동에 관한 실험적 연구, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제19권, 제5호, pp.557-567.

Ashour, S. A. (2000) Effect of Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on Flexural Behavior of High-strength Concrete Beams, *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 5, pp.413-423.

Dunai, L., Fukumoto, Y. and Ohtani, Y. (1996) Behaviour of Steel-to-concrete Connections under Combined Axial Force and Cyclic Bending, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 36, No. 2, pp.121-147.

Hino, S., Hamada, S., Kaneyuki, K., Hasegawa, H., and Nakano, H.(1985) Flexural Behavior of Mixed Steel-Concrete Beams with Various Joints, *Memoirs of the Faculty of Engineering in Yamaguchi Univeristy*, Vol. 35, No. 2, pp. 291-299.

Matsuishi, M., Hattori, Y., Iwata, S., Ishihama, T., Yamamoto, T. and Kitazono, M. (1985) Ultimate Strength of Composite Steel-Concrete Structure of Sandwich System, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 157, pp. 233-230.

Oguejiofor, E. C. and Hosain, M. U. (1995) Tests of Full-size Composite Beams with Perfobond Rib Connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, pp.80-92.

Oguejiofor, E. C. and Hosain, M. U. (1997) Numerical Analysis of Push-Out Specimens with Perfobond Rib Connectors, *Computers and Structures*, Vol. 62, No. 4, pp.617-624.

Teo, D. C. L., Mannan, M. A. and Kurian, V. J. (2006) Flexural Behaviour of Reinforced Lightweight Concrete Beams Made with Iil Palm Shell, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 3, pp.459-467.

Zimmerman, T. (1993) *Development and Testing of a Composite Ice-Resisting Wall*, Ph.D. Dissertation, University of Alberta, Canada.

(접수일자 : 2009. 6. 12 / 심사일 2009. 6. 17 / 게재확정일 2009. 10. 17)