

데크플레이트의 직봉을 전단연결재로 활용하는 방안에 관한 연구

A Study on the Ways to Use Vertical Bars of Deck Plate as Shear Connectors

김 성 배* 박 동 수** 서 동 기***
Kim, Sung-Bae Park, Dong-Soo Seo, Dong-Gi
 이 용 교**** 김 상 섭*****
 Lee, Yong-Gyo Kim, Sang-Seup

Abstract

Composite Beams have various effects as one unit structural member of a steel beam and a Reinforced Concrete Slab. In Composite Beam, install Shear Connectors to resist horizontal shear on an interface between two members. And when applying to the Deck Plate Slab, vertical Bars are installed for insure safety during the construction. Therefore, this study attempts to examine the ways to develop and utilize a New-Shaped Shear connectors which is functioning as vertical bars and also securing a higher shear capacity using Deformed Bar and Plate instead of Used-Stud Connector.

키워드 : 합성보, 전단연결재, 데크플레이트, 이형철근, 직봉
Keywords : Composite Beam, Shear Connector, Deck Plate, Deformed Bar, Vertical Bar

1. 서 론

오늘날의 고층 철골 건축물의 골조는 바닥구조를 철근 콘크리트로 하는 합성보 구조시스템을 많이 이용하고 있다¹⁾. 이에 따라 최근 철골구조의 처짐, 진동 특성 등에 대한 사용성 문제와 철근콘크리트구조의 단면이 커지는 단점을 보완하기 위해서 합성구조의 개발이 활발히 진행되고 있다^{2),3)}. 합성보는 기존의 강재보와 철근콘크리트 슬래브가 하나의 단일 부재로 거동하는 구조부재로써 각 구조의 장점을 극대화 시키고, 층고 절감과 사용성 증대, 경비 절감 등의 다양한 효과를 갖는다⁴⁾.

강재보와 철근콘크리트 슬래브의 경계면에서 작용하는 수평전단력에 저항하기 위해 시어커넥터(Shear connector, 이하 전단연결재)를 설치한다. 전단연결재의 종류는 철근을 비롯하여 스티드와 형강 등이 다양하게 사용된다^{5),6)}. 전단연결재로 일체화된 합성보는 슬래브의 콘크리트 부분이 보 단면의 일부로 사용되어 휨 응력을 받을 때 압축력의 대부분은 콘크리트가 부담하고, 인장력은 강재가 부담하는 효율적인 구조부재로 보의 춤을 줄여 층고 감소가 가능케 한다. 또한 바닥구조의 강성증대로 장스팬 구조물이 가능하게 하고 극한하중까지 내력이 증대되는

장점이 있다^{7),11),12),17)}.

일반적으로 강재보에는 데크플레이트 슬래브를 적용한다. 데크플레이트는 합성용과 거푸집용으로 구분되는데, 최근에는 강관가격의 급등으로 거푸집용 데크플레이트가 주로 사용되고 있다. 거푸집용 데크플레이트는 그림 1과 같이 철근트러스가 끝나는 양단부에 직봉(Vertical bar)을 설치한다. 직봉의 용도는 데크플레이트가 강풍과 돌풍에 날아가지 않게 하기 위한 것이며⁸⁾, 강재보에 고정지점으로 작용하여 시공하중에 대해 추가적인 안전성을 확보하는데 효과적이다. 데크플레이트는 대부분 보 길이방향에 직각으로 데크플레이트 주근이 설치되며(그림 1), 강재보 상부플랜지에는 직봉설치 후 전단연결재를 별도로 시공한다. 그러므로 직봉을 전단연결재로 활용할 수 있다면 시공성이 상당히 개선될 수 있다.

이에 본 연구에서는 데크플레이트에 사용되는 직봉을 전단연결재로 활용하는 방안을 검토하기 위해 다양한 형상의 전단연결재를 개발하여 시험하였다. 본 연구는 그 일부로 푸시아웃(Push-out) 시험을 통해 기존에 사용되고 있는 스티드커넥터와 비교 평가하였다.

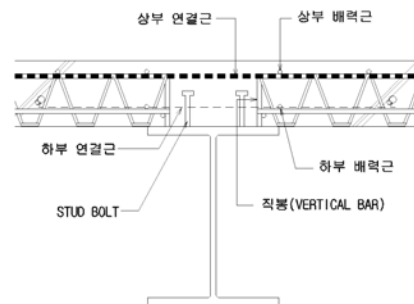






그림 1. 강재보와 데크플레이트 상세

* (주) 센구조연구소 소장, 공학박사
** 한국기술교육대학교 건축공학부 석사과정
*** (주) 센구조연구소 팀장, 공학석사
**** (주) 코스틸 기술연구소 과장, 공학사
***** 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
(교신저자, 이메일 : kimss@kut.ac.kr)

“본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발 사업(No.00043608-1)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.”

표 1. 실험체 일람표

실험체 명	전단연결재 종류	전단연결재 형상	모살사이즈 (mm)	용접길이 (mm)	전단연결재 기울기	실험체 수	비고
P-S-16-#	스터드커넥터 D16@250		-	-	-	2	1차 실험
P-RC-13*4-#	HD13 이형철근	 (연속형)	4	100	45°	3	
P-RC-13*6-#	HD13 이형철근		6	100	45°	2	
P-RC-13W*6-#	HD13 용접용철근		6	100	45°	2	2차 실험
P-VRC-13W*6-#	HD13 용접용철근	6	100	90°	2		
P-RS-13-#	HD13 이형철근	 (단속형)	4	100	45°	3	1차 실험
P-PL-9-#	Plate 9mm		6	180	-	2	

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험 개요

표 1은 실험체 계획 및 각 실험체의 제원이다. 실험은 1차와 2차로 구분하여 총 16개를 제작하였다.

전단연결재의 종류는 일반적으로 사용되는 스투드커넥터 외에 HD13 이형철근(SD400), HD13 용접용철근(SD400W), 9mm 철판을 T자 모양으로 용접제작한 형태 등 4가지이다. 전단연결재는 강재보에 용접접합 하였다. 강재보와 전단연결재의 용접접합방법에 의한 영향을 평가하기 위해 모살사이즈는 4mm, 6mm로 하였고, 용접길이는 전단연결재 1개소 당 용접량이다. 또한 테크플레이트 상부근의 높이에 의한 전단연결재의 각도변화를 고려하여 45°와 90°로 구분하여 제작하였다.

실험체의 형상은 리하이(Lehigh) 대학 적용 예와 BS CP 117, Part 1 등을 참고하여 제작하였다^{13),14)}. H형강은 250×250×9×14(mm, SS400) 이고, 양측면의 콘크리트는 500×1,000×150(mm, 폭×길이×두께)이다. 콘크리트 타설은 슬래브와 동일하게 한 면씩 높혀서 타설하였다. 그림 2는 실험체 명칭에 대한 기호이고, 그림 3은 각 실험체 형상에 대한 상세 등이다.

P-S-16 시리즈 실험체는 D16 스투드커넥터를 전단연결재로 사용한 기준 실험체이며, 플랜지 한쪽 면에 2열 3줄로 총 12개의 스투드커넥터를 탄산가스아크용접으로 접합하였다. 각 실험체의 용접방법은 모두 동일하다.

P-RC-13*4 시리즈 실험체는 전단연결재로 그림 3(a), (d)와 같이 HD13(SD400) 이형철근을 연속으로 절곡한 후 강재보 플랜지와 45° 경사지게 설치하였다. 플랜지 양쪽에 2열로 설치하였으며, 모살사이즈는 4mm이다. 전단연결재를 45° 경사지게 설치한 것은 테크플레이트의 상부근과 강재보를 용접하여 직봉기능을 겸하기 위한 것이다. 용접량은 기준 실험체(P-S-16)의 스투드커넥터와 비교하여 충분한 내력이 확보되도록 산정하였으며, 용접길이는 삼각형 형상 1개소 당 100mm이고, 전체 용접길이는 300mm이며, 양면 모살용접하였다.

P-RC-13*6 시리즈 실험체는 P-RC-13*4 시리즈 실험체와 같은 형태의 전단연결재를 설치한 실험체이며, 모살사이즈만 6mm를 적용하였다.

P-RC-13W*6 시리즈 실험체는 전단연결재로 용접용철근 HD13(SD400W)을 사용하였으며, 모살사이즈는 6mm이고, 나머지 변수는 P-RC-13*4 시리즈 실험체와 동일하다.

P-VRC-13W*6 시리즈 실험체는 전단연결재로 HD13(SD400W) 용접용철근을 적용하였으며, 모살사이즈는 6mm, 전단연결재의 경사각은 90°이고, 그 외는 P-RC-13*4 시리즈 실험체와 동일하다.

P-RS-13 시리즈 실험체는 전단연결재로 그림 3(b), (e)와 같이 HD13 이형철근을 개별로 절곡한 후 강재보 플랜지와 45° 경사지게 하여 설치한 실험체이다. 개수는 스투드커넥터와 동일하게 플랜지 양쪽에 2열 3줄로 총 12개이며, 모살사이즈는 4mm이고, 각 개소의 용접길이는 100mm이다.

P-PL-9 시리즈 실험체는 전단연결재를 그림 3(c), (f)와 같이 9mm 철판을 T모양으로 용접하여 제작 후 수직부를 강재보에 설치하고 모살용접 하였다. 이 형상은 T자의 상부면 만큼 테크플레이트를 하단으로 내릴 수 있어 충고질감 효과를 갖는다. T형상의 전단연결재와 강재보의 접합은 모살용접 하였으며, 걸침길이는 60mm이고, 용접길이는 60mm 씩 3개소로 180mm가 된다.

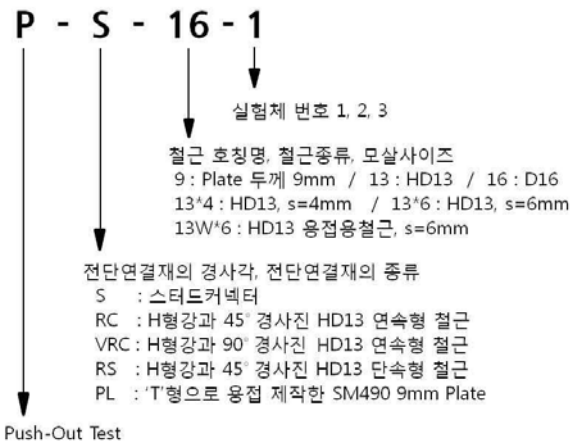


그림 2. 실험체 기호 및 명칭

데크플레이트의 직봉을 전단연결재로 활용하는 방안에 관한 연구

2.2 소재 시험

실험체 제작에 사용된 콘크리트의 배합비는 표 2와 같다. KS F 2404에 따라 제작된 직경 100mm, 높이 200mm의 실린더형 공시체는 본 실험체와 동일한 조건하에서 양생시켰으며, 본 실험과 동시에 압축강도시험을 하였다. 실험결과 콘크리트의 압축강도는 29.5MPa 이다.

실험체에 사용된 강재는 HD13 이형철근, HD13 용접용철근, D16 스티드, H형강으로 사용된 SS400의 플랜지와 웨브이다. 강재에 대한 인장시험은 KS B 0802에 의하여 철근 및 강재에 대한 항복강도와 인장강도, 연신율 등을 측정하였으며, 실험결과와는 표 3과 같다.

표 2. 콘크리트 배합비

설계 강도 (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	단위 재료 소요량(kg/m ³)				
			물	시멘트	잔골재	굵은 골재	혼화재
27	46.1	47.5	160	344	864	974	1.74

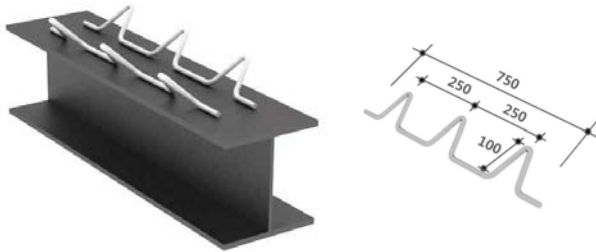
표 3. 인장강도 시험결과

구 분	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)
HD13 이형철근	491.8	615.3	176.2	18.05
HD13 용접용철근	582.9	668.4	194.8	17.17
T형 Plate(9mm)	385.6	497.9	204.8	19.14
플랜지(14mm)	276.4	430.2	198.9	41.40
웨브(9mm)	302.8	436.1	194.0	36.12

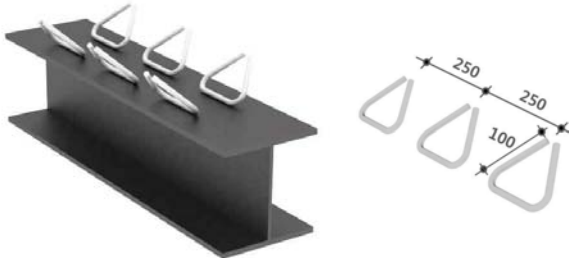
2.3 실험 방법

실험은 최대용량이 2,000kN인 만능시험기(이하 U.T.M)를 이용하여 그림 4와 같이 설치한 후 단조가력 하였다.

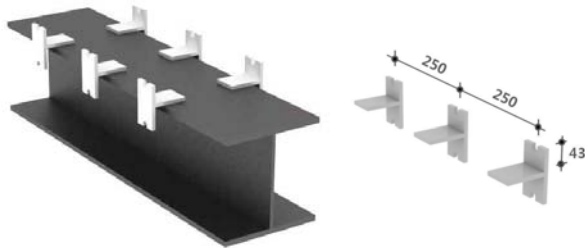
가력속도는 1mm/min이고, 변위제어로 하였다. 변위는 그림 4와 같이 H형강 웨브에 변위계를 설치하여 측정하였고, 콘크리트의 탈락 및 벌어짐을 측정하기 위해 콘크리트면의 좌우에도 동일하게 설치하였다.



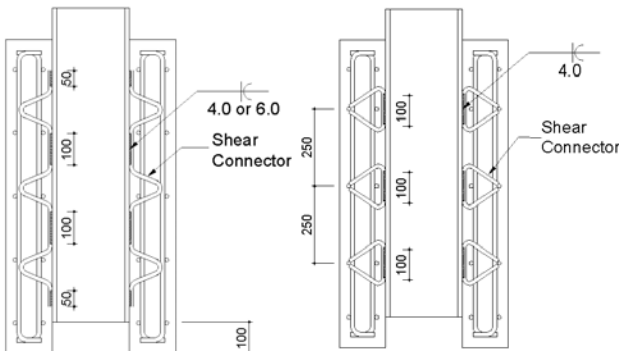
a) 전단연결재 ; HD13 이형철근(연속형 철근)



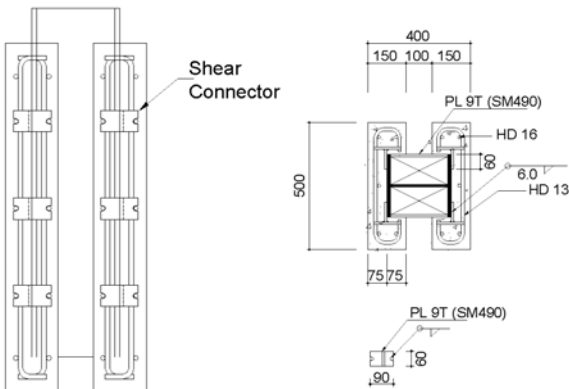
b) 전단연결재 ; HD13 이형철근(단속형 철근)



c) 전단연결재 ; SM490 9mm Plate



d) P-RC-13*4, P-RC-13*6, P-RC-13W*6 실험체
e) P-RS-13-# 실험체



f) P-PL-9-# 실험체

그림 3. 전단연결재 형상 및 상세

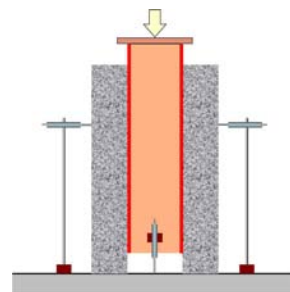


그림 4. 실험체 설치도

3. 실험결과

3.1 최대내력 및 파괴양상

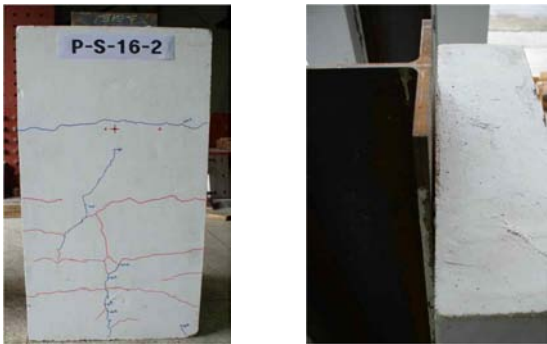
3.1.1 P-S-16 시리즈 실험체(기준형)

P-S-16 시리즈 실험체는 기준 실험체로 D16 스테드커넥터를 전단연결재로 사용한 실험체이다. 플랜지 일면에 2열 3줄로 6개씩 총 12개의 스테드커넥터가 설치되었다. 전반적인 파괴양상은 콘크리트 파괴 이전에 스테드커넥터가 전단파괴 되는 양상을 보였고, 콘크리트의 별다른 균열은 보이지 않았다.

사진 1은 P-S-16 시리즈 실험체의 파괴양상이다.

P-S-16-1 실험체는 가력시작 후 최대하중 1,023kN에서 하중이 저하되기 시작하였고, 콘크리트의 파괴 이전에 스테드커넥터의 용접부가 전단파괴 되어 최상단 H형강과 콘크리트면 사이에 최대 9.0mm 이격현상이 나타났다.

P-S-16-2 실험체는 가력시작 후 최대하중 988.1kN에서 하중이 저하되기 시작하였고, P-S-16-1 실험체와 마찬가지로 콘크리트의 파괴 이전에 스테드커넥터 용접부가 전단파괴 되어 H형강과 콘크리트면 사이에 최대 7.7mm 이격현상이 나타났다.



a) 실험 종료 후 전경 b) H형강과 콘크리트의 이격현상


사진 1. P-S-16 시리즈 실험체의 파괴양상



사진 2. P-RC-13*4-3 실험체의 파괴양상

사진 3. P-RC-13*6-1 실험체의 파괴양상

3.1.2 P-RC-13*4, P-RC-13*6 시리즈 실험체

P-RC-13*4와 P-RC-13*6 시리즈 실험체는 HD13 이형철근을 전단연결재로 사용한 실험체로써, HD13 이형철근을  모양으로 절곡한 후, H형강의 플랜지

면에 45°의 경사로 양면 모살용접하였다. 모살사이즈는 각각 4mm, 6mm이고, 용접길이는 한 변 당 전체 300mm씩 4개소이다.

P-RC-13*4-1 실험체는 가력시작 후 최대하중 1,324kN에 도달한 후, 하중이 서서히 감소하다가 약 1,233kN에서 1,059kN으로 하중이 급격히 감소하였다. 이 후 하중이 1,100kN까지 재상승한 후 하중을 유지하다가 다시 하중이 급격히 감소하는 양상이 나타났다. 또한 콘크리트면과 H형강 마구리면을 따라 균열이 발생하였고, 전단연결재의 파단으로 인해 H형강과 콘크리트면 사이에 최대 16.6mm 이격현상이 나타났다.

P-RC-13*4-2 실험체는 최대하중이 1,250kN으로 나타났고, 이 후의 파괴양상은 P-RC-13*4-1 실험체와 비슷한 경향이 나타났다.

P-RC-13*4-3 실험체는 가력시작 후 최대하중 1,306kN에 도달하였고, 이 후 하중이 감소하다가 다시 급격히 하중이 감소하는 앞의 두 실험체와 비슷한 양상이 나타났다. 또한 사진 2와 같이 전단연결재가 설치되어 있는 위치의 슬래브 하부면(H형강 플랜지 상부면)에서 균열이 심화되어 파괴되었다.

P-RC-13*6-1 실험체는 가력시작 후 최대하중 1,155kN에 도달한 후, 하중이 1,024kN까지 저감하다 1,075kN으로 재상승한 후 다시 하중이 급격히 감소되는 P-RC-13*4 시리즈 실험체와 비슷한 양상을 보였다. 그러나 P-RC-13*4 시리즈 실험체에 비해 실험체 하부 콘크리트 압괴현상이 크게 나타났으며, 전단연결재가 있는 위치에서 발생한 균열로 인해 파괴되었다. 실험 종료 후 실험체의 전경은 사진 3과 같다.

P-RC-13*6-2 실험체는 최대하중 1,281kN에 도달 후 파괴되었으며, 이 후의 파괴양상은 P-RC-13*6-1 실험체와 비슷하다. 균열은 전단연결재 주변에서 발생되어 콘크리트면으로 진전되었으며, 전단연결재의 파단으로 H형강과 콘크리트면 사이에 최대 18.9mm 이격현상이 발생하였다.

3.1.3 P-RC-13W*6 시리즈 실험체

P-RC-13W*6 시리즈 실험체는 전단연결재로 HD13 용접용철근(SD400W)을 사용한 실험체로써, 전단연결재의 형상 및 모살사이즈 등은 P-RC-13*6 시리즈 실험체와 동일하다.

P-RC-13W*6-1 실험체는 최대하중 1,409kN에 도달한 후 하중이 저감하였고, 사진 4와 같이 전단연결재 주변에 균열이 발생하여 콘크리트 면으로 진전되었다. 또한 하부 콘크리트가 압괴되면서 균열이 심화되었다.

P-RC-13W*6-2 실험체는 가력시작 후 최대하중 1,444kN에서 하중이 저감되었고, 전단연결재의 파단으로 H형강과 콘크리트면 사이에 최대 9.1mm 이격현상이 나타났다.

3.1.4 P-VRC-13W*6 시리즈 실험체

P-VRC-13W*6 시리즈 실험체는 HD13 용접용철근(SD400W)을 전단연결재로 사용한 실험체이며, P-RC-13*4

시리즈 실험체와 동일한 형상으로 절곡하였다. H형강의 플랜지 면과 이루는 경사각은 45°에서 90°로 변경하여 수직하게 모살용접하였다. 모살사이즈는 6mm이고, 용접길이는 한 변 당 300mm씩 총 4개소이다.

P-VRC-13W*6-1 실험체는 최대하중 1,586kN에 도달한 후, 하중이 1,477kN까지 감소하다 약간 재상승한 후 다시 1,245kN으로 하중이 급격히 감소하는 양상을 보였다. H형강과 콘크리트면 사이에 균열이 발생하였고, 이 균열의 진전으로 이격현상이 나타났으며, 이격길이는 최대 12.3mm이다.

P-VRC-13W*6-2 실험체는 최대하중 1,681kN에서 하중이 저감되었고, 사진 5와 같이 전단연결재가 있는 위치에서 균열이 발생하여 콘크리트 면과 H형강 마구리면을 따라 진전하면서 파괴되었다.



사진 4. P-RC-13W*6-1 실험체의 파괴양상



사진 5. P-VRC-13W*6-2 실험체의 파괴양상



사진 6. P-RS-13-3 실험체 파괴양상



사진 7. P-PL-9-1 실험체 파괴양상

3.1.5 P-RS-13 시리즈 실험체

P-RS-13 시리즈 실험체는 전단연결재로 HD13 이형철근을 사용한 실험체이다. HD13 이형철근을 △ 모양으로 절곡한 후, H형강 플랜지 면에 45°의 경사로 양면 모살용접하였다. 모살사이즈는 4mm이고, 용접길이는 전단연결재 한 개의 한 변당 100mm씩 12개소이다.

P-RS-13-1 실험체는 가력시작 후 최대하중 1,128kN에 도달한 후, 실험이 종료될 때까지 하중이 서서히 감소하였다. 전단연결재 주변에 균열이 발생하기 시작하여 콘크리트 면으로 진전되었으며, 하부 콘크리트의 압괴현상으

로 파괴되었다. 또한 전단연결재의 파단으로 H형강과 콘크리트면 사이에 이격현상이 나타났으며, 최대 이격길이는 10.4mm이다.

P-RS-13-2와 P-RS-13-3 실험체는 최대하중이 각각 992.5kN, 1,049kN으로 나타났으며, 전단연결재가 있는 위치에서 균열이 발생하여 콘크리트 면으로 진전되었다. 이러한 파괴양상은 P-RS-13-1 실험체와 비슷하며, 사진 6과 같다.

3.1.6 P-PL-9 시리즈 실험체

P-PL-9 시리즈 실험체는 전단연결재로 9mm 강판을 사용한 실험체로써, 플레이트를 T 모양으로 H형강 플랜지에 걸친 후 돌출부를 모살용접하였다. 강판의 수직부 상하부에 철근트러스의 상부근과 하부근이 고정되는 형상이므로 데크플레이트 슬래브의 일정 높이 만큼 층고절감의 효과를 갖을 수 있다.

P-PL-9-1 실험체는 가력시작 후 최대하중 1,355kN에 도달한 후, 전단연결재가 있는 위치에서 균열이 발생하여 콘크리트 면으로 진전되면서 심각한 균열이 발생하였다. 이러한 균열의 증가와 더불어 전단연결재 주변의 콘크리트가 파괴되면서 H형강과 콘크리트면 사이에 최대 5.7mm 이격현상이 나타났고, 하부 콘크리트의 압괴로 인해 파괴되었다. 실험 종료 후 전경은 사진 7과 같다.

P-PL-9-2 실험체는 최대하중 1,262kN에 도달한 후, 하중이 다소 급하게 감소하였고, 전체적인 파괴양상은 P-PL-9-1 실험체와 거의 동일하다.

3.2 하중-변위 곡선

그림 5는 시리즈별 각 실험체의 하중-변위 곡선이다. 하중-변위곡선에서 실험종료는 파괴가 심각하여 실험진행이 어렵거나, 최대하중의 70% 이하로 저하될 때까지 가력하였다.

P-S-16 시리즈 실험체는 전단연결재인 스티드커넥터의 전단파괴로 인해 점차적인 하중 감소와 함께 파단되었다.

P-RC-13*4 시리즈와 P-RC-13*6 시리즈 실험체는 최대하중 이후 하중이 감소하다가 재상승 후, 다시 하중이 저하되면서 파괴되었다. 이것은 전단연결재가 있는 위치에서의 균열 발생 및 진전으로 인해 하중이 저감되면서, 내부의 이형철근의 저항으로 하중이 재상승 한 것으로 판단된다.

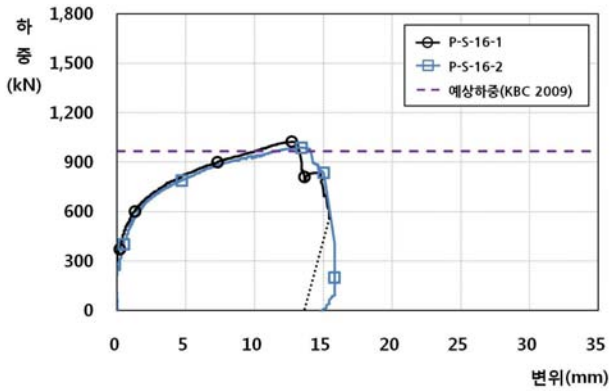
P-RC-13W*6 시리즈 실험체는 전반적으로 최대하중에 도달한 이후, 점차적으로 하중 감소와 함께 내력이 저하되는 것으로 나타났다.

P-VRC-13W*6 시리즈 실험체는 P-RC-13*4 시리즈 실험체 및 P-RC-13*6 시리즈 실험체와 비슷한 곡선을 보였으나, P-VRC-13W*6 시리즈 실험체의 최대하중이 더 높게 평가되었다. P-VRC-13W*6-1 실험체의 경우에는 최대하중에 도달한 이후 1,563kN에서 1,245kN으로 하중이 급격히 감소하는 구간이 나타났는데, 이것은 용접부

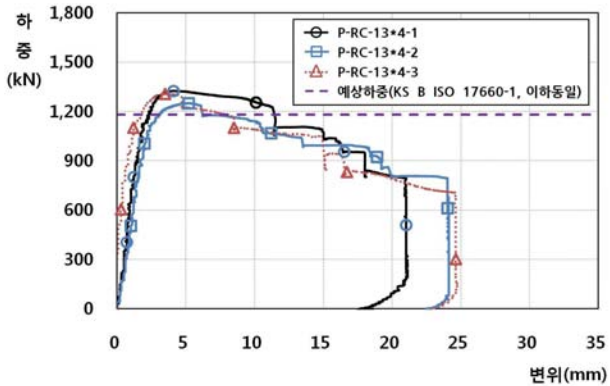
파괴에 의한 하중의 하락으로 판단된다.

P-RS-13 시리즈 실험체는 최대하중에 도달한 이후, 하중이 서서히 감소하는 완만한 곡선을 보였다. 전단연결재가 있는 위치에서 발생한 균열의 진전으로 실험체가 파괴되었고, 일부 하부 콘크리트의 압괴현상이 나타났다.

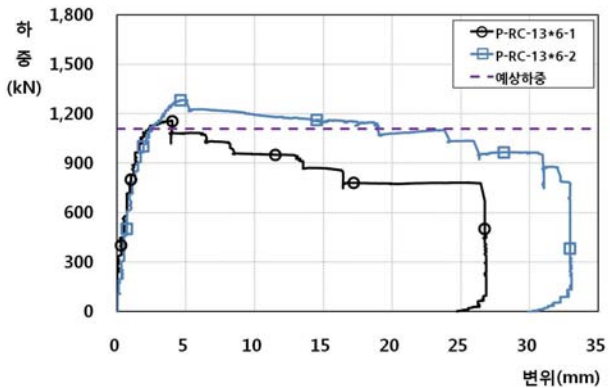
P-PL-9 시리즈 실험체는 다른 실험체에 비하여 변위가 확보되지 못하여 최대하중 이후에 나타난 하중의 감소곡선의 기울기가 크게 나타났다. 전단연결재가 있는 위치에서의 심각한 균열과 하부 콘크리트의 압괴현상에 의해 파괴되었다.



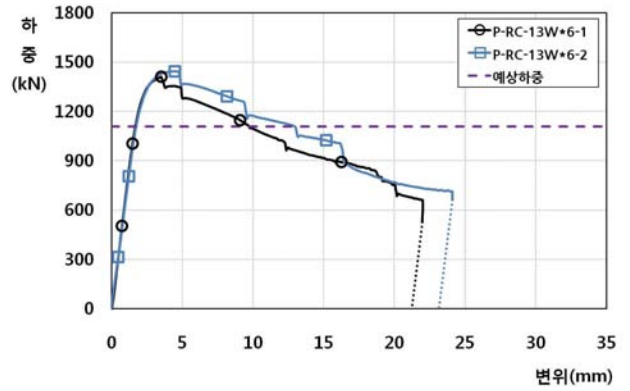
a) P-S-16 시리즈 실험체



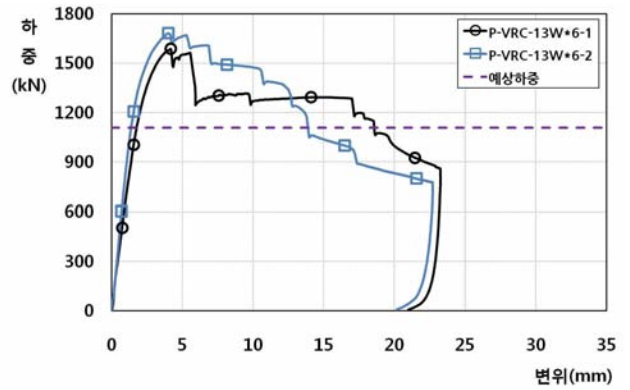
b) P-RC-13*4 시리즈 실험체



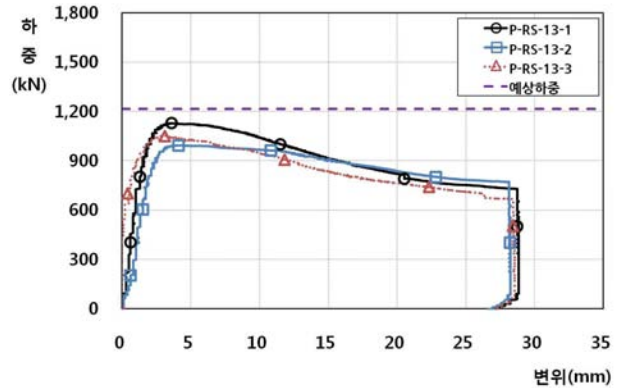
c) P-RC-13*6 시리즈 실험체



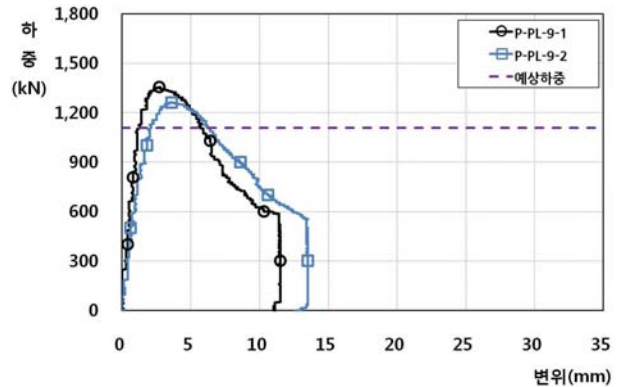
d) P-RC-13W*6 시리즈 실험체



e) P-VRC-13W*6 시리즈 실험체



f) P-RS-13 시리즈 실험체



g) P-PL-9 시리즈 실험체

그림 5. 각 시리즈 실험체의 하중-변위 곡선

4. 실험결과 분석

4.1 항복하중 및 최대하중

표 4는 실험결과를 바탕으로 항복하중과 최대하중 및 초기강성 등을 정리한 것이다. 실험결과에서 항복하중은 초기강성과 최대하중의 선을 교차시켜 만나는 점을 항복 변위로 산정하였고, 이 항복변위와 실험곡선이 만나는 점의 하중을 항복하중으로 정의하였다. 초기강성은 하중-변위곡선에서 항복하중의 1/3과 2/3선의 기울기를 연장하여 초기강성으로 산정하였다.

항복하중과 실험에 의한 최대하중은 스티드커넥터를 적용한 P-S-16 시리즈의 기준 실험체 보다 모두 높게 평가되었다. 또한 전단연결재로 HD13 용접용철근(연속형 철근)을 H형강 플랜지에 수직으로 용접한 P-VRC-13W*6-2 실험체가 항복하중 및 최대하중이 가장 높게 나타났다. 최대하중을 항복하중으로 나눈 내력비는 1.02~1.37의 값을 나타내었다. 초기강성은 최대하중과 비례하는 경향을 보이며 편차가 크나, 단속철근으로 전단연결재를 사용한 P-RS-13 시리즈 실험체가 상대적으로 높게 나타났다.

4.2 전단연결재의 공칭강도 산정

표 4에서 공칭강도의 산정은 스티드커넥터의 경우 (1)식을 적용한다. 실험결과와 평균치를 (1)식에 의해 산정한 스티드커넥터의 공칭강도로 나누면 내력비는 1.04가 되어 실험결과를 다소 상회한다.

$$Q_n = 0.5A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq R_g R_p A_{sc} F_u \quad (1)$$

A_{sc} ; 스티드커넥터의 단면적(mm²)
 E_c ; 콘크리트 탄성계수(= 8500³√ $f_{ck} + 8$)
 R_g, R_p ; 감소계수(본 연구, $R_g = R_p = 1.0$)
 F_u ; 스티드커넥터의 인장강도

철근을 전단연결재로 사용하는 경우 공칭강도 산정은 (1)식을 참고하여, (2)식과 같이 구할 수 있다. 이 때 철근을 이용한 전단연결재의 공칭강도는 용접부 강도와 철근의 강도로 구분할 수 있으며, (1)식과 같이 용접부 강도는 철근의 강도(단면적×인장강도)를 상회하지 못하는 것으로 한정할 수 있다. 목두께(a)는 판재와 철근의 산정방법이 다르고, 철근의 경우 용접부 강도는 한국산업규격(KS)과 미국용접학회(AWS) 기준이 상이하다. 한국산업규격에 명기된 목두께와 건축구조기준에서 제시한 용접하는 모재의 항복강도를 용접부 강도로 산정하였다. 또한 미국용접학회의 목두께 산정기준과 AISC에서 제시한 용착금속의 인장강도를 용접부 강도로 적용하여 (2)식을 검토하였다^{9),10),15),16)}. 사용된 용접봉은 KS D 7104의 YFW C50DR 이며, 최저 인장강도는 490MPa이다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$Q_n = a l_e F_w \leq 2 \times A_r f_u \quad (2)$$

a ; 목두께, l_e ; 유효용접길이($l_e = l - 2s$)
 s ; 모살사이즈 F_w ; 용접부 강도

A_r ; 철근의 단면적 f_u ; 철근의 인장강도

목두께(a)와 용접부 강도(F_w)는 다음과 같이 3가지로 구분하여 평가한다.

- ① KBC 2009 ; 판재
 $a_1 = 0.7s, F_{w1} = 0.6F_y$
 F_y ; 모재의 항복강도
- ② KS B ISO 17660-1 ; 철근
 $a_2 = 0.3d(\text{min. } 3\text{mm}), F_{w2} = 0.6F_y$
 F_y ; 모재의 항복강도
- ③ AWS D 1.4, AISC ; 철근
 $a_3 = 0.2d, F_{w3} = 0.6F_u$
 F_u ; 용착금속의 인장강도

(2)식에서 우변항에 2를 곱한 값은 철근으로 제작한 전단연결재의 절단면이 두 군데가 되기 때문이다. 또한 (2)식을 적용하여 T자형 강관을 적용한 P-PL-9 시리즈 실험체의 공칭강도도 산정하였다. 표 4는 (2)식으로 산정한 공칭강도를 세 가지로 구분하여 각 시리즈 실험체의 최대하중과 비교하여 나타낸 것이고, 표 5는 ①~③에 따른 전단내력비의 평균과 표준편차, 변동계수를 나타낸 것이다. KS B ISO 17660-1에 의한 평균값은 1.129로 실험값이 약간 크게 나타났으며, 변동계수는 KBC 2009에 따른 값이 0.148로 가장 작게 나타났다.

표 4. 실험결과 및 분석

실험체명	P_y (kN)	P_u (kN)	P_u/P_y	K (kN/mm)	δ_u (mm)	Q_{n1} (kN)	Q_{n2} (kN)	Q_{n3} (kN)	Q_{test}/Q_{n2}
P-S-16-1	747.4	1,023.2	1.37	311.1	12.71	964.8	964.8	964.8	1.06
P-S-16-2	744.6	988.1	1.33	275.5	13.41				1.02
P-RC-13*4-1	1,185.6	1,324.5	1.12	789.6	4.10	846.5	1,179.0	1,638.9	1.12
P-RC-13*4-2	1,082.7	1,249.5	1.15	721.1	5.21				1.06
P-RC-13*4-3	1,196.5	1,305.8	1.09	796.8	3.70				1.11
P-RC-13*6-1	1,100.2	1,154.8	1.05	610.5	4.00	1,193.9	1,108.6	1,541.0	1.04
P-RC-13*6-2	1,055.3	1,281.4	1.21	878.5	4.61				1.16
P-RC-13W*6-1	1,231.7	1,409.3	1.14	695.5	3.52	1,193.9	1,108.6	1,541.0	1.27
P-RC-13W*6-2	1,257.7	1,444.0	1.15	675.9	4.48				1.30
P-VRC-13W*6-1	1,326.7	1,586.4	1.20	631.4	4.18	1,193.9	1,108.6	1,541.0	1.43
P-VRC-13W*6-2	1,344.6	1,681.3	1.25	829.6	4.02				1.52
P-RS-13-1	1,037.1	1,127.9	1.09	863.3	3.60	871.7	1,214.2	1,687.8	0.93
P-RS-13-2	917.9	992.5	1.08	611.3	4.41				0.82
P-RS-13-3	941.3	1,049.5	1.11	1,044.7	3.10				0.86
P-PL-9-1	1,333.1	1,354.6	1.02	739.8	2.70	1,193.9	1,108.6	1,541.0	1.22
P-PL-9-2	1,131.7	1,261.6	1.11	628.1	3.60				1.14

P_y ; 항복하중 P_u ; 최대하중 P_u/P_y ; 내력비 K ; 강성
 δ_u ; 최대하중 시 변위, Q_{n1} ; (2)식 ①을 적용한 공칭강도
 Q_{n2} ; (2)식 ②를 적용한 공칭강도, Q_{n3} ; (2)식 ③을 적용한 공칭강도
 Q_{test}/Q_{n2} ; 전단내력비, $Q_{test} = P_u$

표 5. ①~③에 따른 전단내력비의 평균, 표준편차, 변동계수

	KBC 2009	KS B ISO 17660-1	AWS D 1.4, AISC
	$\frac{Q_{test}}{Q_{n1}}$	$\frac{Q_{test}}{Q_{n2}}$	$\frac{Q_{test}}{Q_{n3}}$
평균	1.229	1.129	0.849
표준편차	0.182	0.183	0.149
변동계수	0.148	0.162	0.175

본 연구는 철근과 판재의 용접이므로 판재 용접 시 목두께를 명시한 KBC 2009를 적용하는 것은 적합하지 않은 것으로 판단된다. 또한 AWS와 AISC에 명시된 목두께와 용착금속의 인장강도를 적용하면 표 5와 같이 $Q_{test}/Q_{n3} \leq 1$ 이 되므로 공칭강도가 실험값을 상회하고, 변동계수도 크게 나타나 신뢰도가 낮은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 한국산업규격(KS B ISO 17660-1)에 따라 공칭강도를 산정하였다.

실험결과를 공칭강도로 나누면, P-RC-13*4의 경우 109.7%, P-RC-13*6의 경우 109.9%, P-RC-13W*6는 128.7%, P-VRC-13W*6은 147.4%, P-RS-13의 경우 87.0%, P-PL-9 시리즈는 118.0%가 된다.

다소간 실험편차를 고려하면 철근으로 전단연결재를 제작하는 경우, 전단연결재의 공칭강도는 용접부 강도로 평가할 수 있으며, 실험결과 약 16.5% 증가되어 실험 및 제작오차 등을 잘 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 변형능력 평가

전단연결재의 형상이 변형능력에 미치는 영향을 평가하기 위해 그림 6과 같은 평가기준으로 연성 및 에너지를 산정하였다. 실험에 의한 항복하중 및 이 때의 항복변위를 기준으로 최대하중 이후 하중이 저감하여 항복하중(P_y)에 도달할 경우의 변위를 최대변위(Δ_u)로 규정하였으며, 최대변위를 항복변위로 나누어 연성(Δ_u/δ_y)으로 평가하였다.

연성과 함께 하중-변위곡선의 전체면적을 에너지로 평가하였다. 일부 실험체의 경우 급격한 하중저하로 실험이 종료되었으나, 대부분 최대하중 이후 충분한 하중저하가 발생되었다고 사료되는 약 70% 이하의 경우 실험을 종료하였다. 그러므로 그 이후 거동은 전체 하중-변위곡선에서 차지하는 비중이 적으므로 하중-변위곡선의 전체면적을 에너지로 평가하여도 가능할 것으로 판단된다. 연성과 에너지에 대한 평가결과는 표 6과 같다. P-RC-13*6 시리즈 실험체만 하중-변위곡선의 편차가 크고 나머지는 편차가 적어 각 시리즈에 대해 평균값으로 정리하였다.

표 6에는 스티드커넥터를 적용한 P-S-16 시리즈 실험체를 기준으로 연성과 에너지의 비를 비교하였다. 비교결과 전단연결재로 9mm Plate를 T형으로 용접한 형태를 사용한 P-PL-9 시리즈의 경우 연성 및 에너지가 2.08과 27,364(kN·mm)으로 스티드커넥터 보다 연성은 저하되었으나, 나머지 시리즈의 경우 연성은 3.89~5.56, 에너지는 21,145.5~61,561.6(kN·mm)의 범위로 나타났다. 연성은

HD13 이형철근(단속형)을 전단연결재로 사용한 P-RS-13 시리즈가, 에너지는 HD13 이형철근(연속형)을 전단연결재로 사용한 P-RC-13*6 시리즈가 가장 우수하였다.

따라서 이형철근을 연속형 또는 단속형으로 제작하여 전단연결재로 사용하는 경우 기준 실험체인 스티드커넥터와 비교하여 충분한 연성 및 에너지가 확보되었으며, 최대내력과 함께 충분한 변형능력도 확보가 가능하다고 평가할 수 있다.

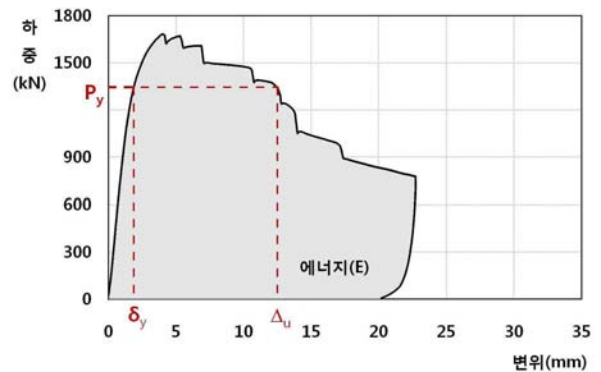


그림 6. 연성 및 에너지평가 방법

표 6. 연성 및 에너지 상대평가

	δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Δ_u/δ_y	E (kN·mm)
P-S-16	3.50	14.97	4.28	21,145.5
P-RC-13*4	2.20	9.68	4.40	49,034.1
P-RC-13*6	2.25	11.61	5.16	61,561.6
P-RC-13W*6	2.09	8.13	3.89	23,538.6
P-VRC-13W*6	2.14	10.4	4.86	27,964.0
P-RS-13	2.07	11.51	5.56	55,450.8
P-PL-9	2.30	4.76	2.08	27,364.0

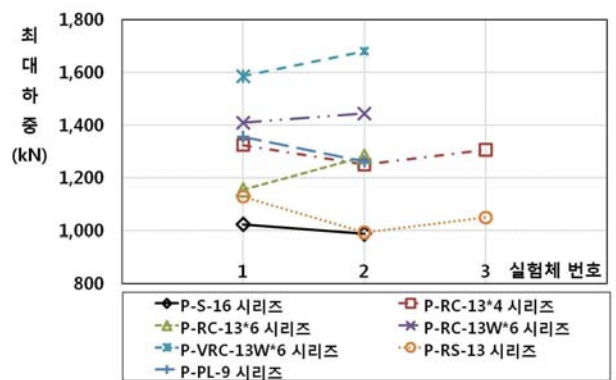


그림 7. 전단연결재의 형상에 따른 최대하중 분포

4.4 접합상세가 전단내력에 미치는 영향

4.4.1 전단연결재의 형상

그림 7은 전단연결재의 형상에 따른 각 시리즈 실험체의 최대하중 분포이다. 기준 실험체인 P-S-16 시리즈 실험체에 비해 모두 최대하중이 높게 나타났다.

전단연결재로 이형철근을 사용한 실험체의 내력이 기준 실험체에 비해 더 높게 평가된 것은 콘크리트와 이형철근의 부착력이 조합되어 전단연결재의 내력이 더 증가한 것으로 판단된다. 또한 전단연결재로 단속형 철근(△)을 사용한 실험체보다 연속형 철근(〰)을 사용한 실험체의 내력이 더 높게 나타났는데, 이것은 연속형 철근의 상부 꼭지점 부분이 단속형 철근과 비교하여 굽김 없이 연속으로 이어져 전단연결재의 일체화로 효과적으로 거동하였기 때문으로 판단된다. 또한 전단연결재로 9mm Plate를 T형으로 용접한 형태를 사용한 P-PL-9 시리즈 실험체가 HD13 이형철근을 전단연결재로 사용한 실험체 보다 내력은 더 높게 평가되었으나 최대하중 이후 하중저하가 가장 급격하게 발생하였다.

전단연결재의 형상이 전단내력에 미치는 영향을 평가한 결과 스테드커넥터 대신 이형철근을 데크플레이트의 직봉과 전단연결재로 활용하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 또한 이형철근은 단속형으로 개별제작 하는 것 보다 연속형으로 제작하여 설치하는 것이 제작 설치 및 내력확보에 효과적이다.

4.4.2 모살사이즈의 영향

그림 8은 모살사이즈가 전단내력에 미치는 영향을 평가한 것이다. 스테드커넥터를 사용한 기준 실험체인 P-S-16 시리즈 실험체의 최대하중과 에너지, 연성의 평균값을 기준으로 P-RC-13*4 시리즈와 P-RC-13*6 시리즈 실험체를 비교한 것이다. 최대하중과 에너지, 연성 모두 기준 실험체 보다 더 높게 나타났다.

모살사이즈가 4mm인 실험체 보다 6mm인 실험체가 에너지와 연성이 26%, 17% 더 높으나, 최대하중은 모살사이즈가 4mm인 실험체가 6mm인 실험체 보다 다소 크게 나타났다.

모살사이즈가 6mm인 실험체(P-RC-13*6-2)에 대해 실험종료 후 콘크리트를 제거하여 전단연결재의 파괴양상을 확인하였다. 사진 8과 같이 전단연결재로 사용한 철근 모재의 압축측에서 파단되지 않고 용접 열영향부에서 파단되었다(사진에 원형으로 표시). 또한 모살사이즈를 측정된 결과 사이즈는 약 5mm 전후로 확인되었다. 모살사이즈가 4mm, 6mm인 실험체는 모두 1회(pass) 용접으로 제작하였으며, 제작과정에서 정확한 모살사이즈가 확보되지 않아 모살사이즈의 영향이 불명확한 것으로 판단된다. 그러므로 모살사이즈를 명확한 치수로 제한하기보다 1회(pass) 용접을 기준으로 제작하는 것이 적합할 것으로 사료된다. 또한 내력은 기준 실험체인 스테드커넥터 보다 우수한 것으로 확인되었다.

4.4.3 이형철근 종류의 영향

그림 9는 이형철근의 종류가 전단내력에 미치는 영향을 평가하기 위해 일반용철근과 용접용철근을 사용한 실험체를 비교하였다. 기준 실험체인 P-S-16 시리즈 실험체의 최대하중과 에너지, 연성의 평균값을 기준으로 P-RC-13*6 시리즈와 P-RC-13W*6 시리즈 실험체를 비교하였다. 최대하중의 평균값은 기준 실험체에 비해 각각 21%, 41% 이상 증가하여 이형철근이 전단연결재로서 내

력은 충분히 확보하는 것으로 판단된다. 또한 전단연결재로 HD13 용접용철근을 사용한 P-RC-13W*6 시리즈가 P-RC-13*6 시리즈 실험체에 비해 최대하중이 약 17% 증가하였으나, 에너지와 연성의 경우 일반용철근이 162%, 33% 더 높게 평가 되었다. 그러므로 이형철근을 전단연결재로 사용하는 경우 이형철근의 종류에 의한 영향은 내력과 연성의 편차가 커서 일반용철근과 용접용철근의 영향을 구분하기는 어려울 것으로 판단된다.



사진 8. 실험 종료 후 콘크리트를 제거한 P-RC-13*6 실험체

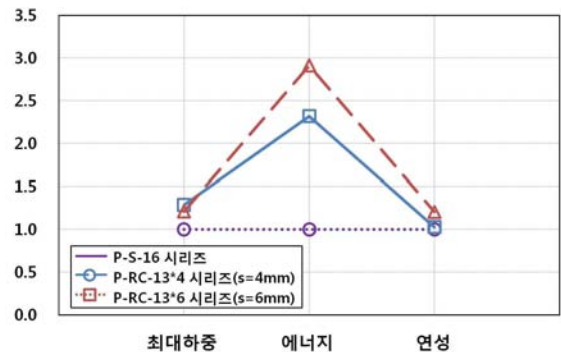


그림 8. 모살사이즈에 따른 비교

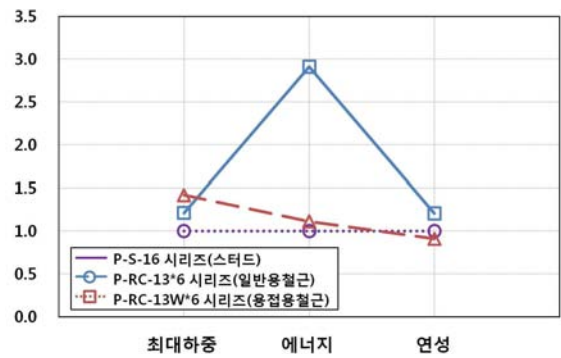


그림 9. 전단연결재의 이형철근 종류에 따른 비교

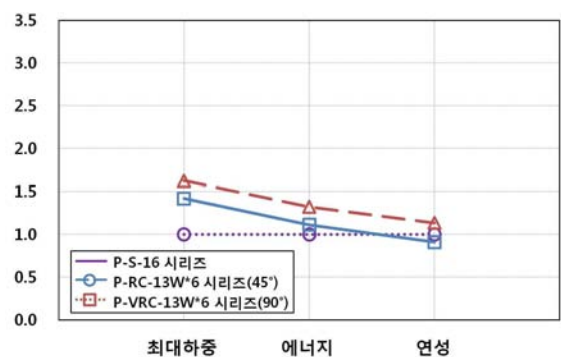


그림 10. 전단연결재의 경사각에 따른 비교

4.4.4 전단연결재 경사각의 영향

그림 10은 전단연결재의 경사각이 전단내력에 미치는 영향을 평가하기 위해 기준 실험체인 P-S-16 시리즈 실험체의 최대하중과 에너지, 연성의 평균값을 기준으로 P-RC-13W*6 시리즈와 P-VRC-13W*6 시리즈 실험체를 비교한 것이다.

최대하중의 평균값은 기준 실험체인 스티드커넥터를 사용한 P-S-16 시리즈에 비해 각각 42%, 62% 더 증가하였다. 전단연결재의 경사각이 90°경사를 이루고 있는 실험체가 45°경사를 이루고 있는 실험체 보다 최대하중은 15%, 에너지는 19%, 연성은 25% 더 높게 나타났다. 이것은 전단연결재가 H형강 플랜지와 45°의 경사를 이루는 실험체의 경우 90°의 경사를 이루고 있는 실험체에 비해 전단연결재 한 개 당 부담하는 콘크리트의 면적이 증가하여 내력이 감소한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 전단연결재를 데크플레이트의 직봉과 겸용하기 위해 철근을 중심으로 전단연결재의 형상이 전단내력에 미치는 영향을 푸시아아웃실험(Push-out Test)을 통해 평가하였고, 결론은 다음과 같다.

1) 철근으로 전단연결재와 직봉을 겸용하도록 제작하여 실험한 결과, 연속형 철근으로 제작한 1개의 전단연결재는 스티드커넥터 1-D16이상의 내력과 연성을 확보하였으며, 이형철근은 단속형으로 개별제작 하는 것 보다 연속형으로 제작하여 설치하는 것이 제작 설치 및 내력확보에 효과적인 것으로 확인되었다. 그러므로 이형철근으로 데크플레이트의 직봉과 전단연결재를 겸용하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

2) 철근으로 전단연결재를 제작하는 경우, 전단연결재의 공칭강도는 용접부 강도로 평가할 수 있으며, 실험결과 용접부 강도의 약 16.5% 이상으로 나타났다. 또한 용접은 양면모살용접을 적용할 수 있으며, 모살사이즈는 제작여건 등을 고려하여 1회(pass) 용접(최소 모살사이즈 4mm)도 가능할 것으로 판단된다.

3) 전단연결재로 사용하는 이형철근의 종류가 미치는 영향은 내력과 연성의 편차가 커서 일반용철근과 용접용철근의 영향을 구분하기는 어려운 것으로 판단된다. 향후 이형철근의 종류에 대한 영향과 철근직경 및 강도(SD500)의 영향을 확인하기 위한 추가연구가 필요하다고 판단된다.

4) 전단연결재의 경사각이 미치는 영향은 전단연결재와 H형강 상부 플랜지가 이루는 각도가 45°인 실험체 보다 90°인 실험체가 최대하중은 15%, 에너지는 19%, 연성은 25% 더 높게 나타났다. 이것은 전단연결재가 45°의 경사를 이루는 경우, 전단연결재 한 개 당 부담하는 콘크리트의 면적이 증가하여 내력이 감소한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박상철, 김필중, 김규석, 「스티드 코넥터의 내력에 관한 실험적 연구(I)」, 대한건축학회지 27권, 113호, pp.55~59, 1983
2. 천성철, 주영규, 정광량, 김상대, 「비대칭 유공 합성보 iTEC H beam의 휨성능평가」, 대한건축학회논문집 구조계, 18권, 4호(통권 162호), pp.67~74, 2002
3. 신현섭, 「합성보 전단연결부의 구조거동에 대한 비교 분석」, 한국강구조학회 논문집, 제17권, 6호(통권 79호), pp.737~747, 2005
4. 김성배, 김상섭, 「T형 합성보의 시어 커넥터 형상에 따른 전단내력 평가에 관한 연구」, 한국강구조학회 논문집, 제18권, 2호(통권 81호), pp.279~288, 2006
5. 선병택, 송현수, 「이형철근을 이용한 합성보의 Shear Connector내력에 관한 연구」, 대한건축학회지 25권 101호 pp.47~51, 1981
6. 한상윤, 정원수, 김덕재, 「합성보에 있어서 이형철근을 사용한 Shear Connector의 내력에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집 7권, 제1호, pp.445~448, 1987
7. 김성배, 함정태, 이창남, 김상섭, 「SRC 기둥-TSC 보 접합부의 거동에 관한 연구」, 대한건축학회논문집 구조계, 22권 6호(통권 212호), pp.55~62, 2006
8. 대한건축학회, 「합성데크 바닥구조 시공지침서」, 1998
9. KS B ISO 17660-1(2007), 용접 - 철근용접 - 제1부 : 하중을 받는 용접 이음, 기술표준원
10. 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설, 2009
11. D.I Mullet, 「Composite Floor Systems」, The Steel Construction Institute, 1988
12. Ivan M. Viest, Joseph P. Colaco et. al, 「Composite Construction Design For Buildings」, ASCE, McGraw-Hill, 1997
13. British Standard Code of Practice, CP 117; Part 1; Composite Construction in Structural Steel and Concrete Part 1; Simply Supported Beams in Buildings
14. Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures: Part 1.1, EN1994-1-1, 1994
15. AISC, Steel Design Guide 21, Welded Connection A Primer for Engineers, 2006
16. AWS D 1.4-98, Structural Welding Code - Reinforcing Steel, 2003
17. 金圭石, 金相燮, 스태드코넥터의せん斷耐力と合成ばり舉動に關する實驗的研究, 日本建築學會構造系論文報告集, 第389號, pp.79~87, 1988

(接受: 2011. 3. 2)