

단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조 보의 전단내력에 관한 실험적 연구

Shear Strength of Hybrid Steel Beam with Reinforced Concrete Ends

김 옥 종* 최 종 권** 문 정 호*** 이 리 형**** 이 동 렬*****
Kim, Ook-Jong Choi, Jong-Kwon Mun, Jeong-Ho Lee, Li-Hyung Lee, Dong-Ryul

ABSTRACT

An experimental study was carried out for hybrid steel beams with reinforced concrete ends. The purpose is to examine the shear strength and to develop the design methodology of the RC-S connection region. Tested were four beams which included a reference beam and three beams with various parameters. The reference beam was used to make a comparison with remaining specimens. The test parameters were focused mostly on the concentrated shear reinforcements. The ratio of concentrated shear reinforcements and their types were investigated in this study.

키워드 : 혼합구조, RC-S 접합부, 전단집중보강근, 고강도 PC강봉

Keywords : Hybrid structure, RC-S connection region, Concentrated shear reinforcements, High strength PC Ulbon

1. 서 론

최근 구조부재의 성능을 최대화하기 위하여 철골구조와 철근콘크리트구조를 혼용한 혼합구조에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조 보의 단부 RC조의 높은 강성과 중앙부 철골조에 의한 장스팬구조를 가능하게 하고, RC 기둥과 효과적인 접합이 가능하여 효율적인 구조시스템을 형성할 수 있다. 이에 관한 연구는 일본에서 시작되었으나 현재까지 국내·외적으로 많은 연구가 진행되고 있지는 않다. 따라서 그 구조적인 거동이 명확하게 규명되지 않았으며, 설계기준도 아직 정립되지 않은 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 혼합구조 보에서 RC조와 철골조의 접합부(이하 "RC-S 접합부"라 함.)에서의 전단력의 전달기구 및 전단내력을 비교하고, 기존 연구에서의 역학적 모델의 타당성과 전단거동을 규명하는 데 그 목적이 있다.

* 한양대 대학원, 박사과정

** 한양대 대학원, 석사과정

*** 정희원, 한남대 건축공학과 교수, 공학박사

**** 정희원, 한양대 건축공학부 교수, 공학박사

***** 정희원, 삼성물산(주)건설부문 건축기술팀, 부장

○ 본 연구는 삼성물산(주)과 초대형구조시스템연구센터의 지원에 의한 것으로, 이에 감사드립니다.

2. 이론적 연구

2.1 파괴형상

단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조 보의 파괴형상은 RC부의 휨파괴 및 전단파괴, 철골 매입단에서의 콘크리트의 지압파괴, RC-S 접합부의 휨파괴 및 전단파괴, 철골의 매입단에서의 철골의 휨파괴, 철골과 RC의 분리에 의한 파괴 등으로 나누어 볼 수 있다. 이중 구조물이 연성적인 파괴거동을 유지하기 위해서는 콘크리트의 단부나 철골부에서의 휨파괴로 유도하는 것이 바람직하다. 따라서 RC-S접합부에서의 전단파괴를 유발하지 않게 하는 방법을 찾기 위해서 접합부에서 전단파괴가 발생하도록 계획된 실험체를 대상으로 연구를 계획하였다.

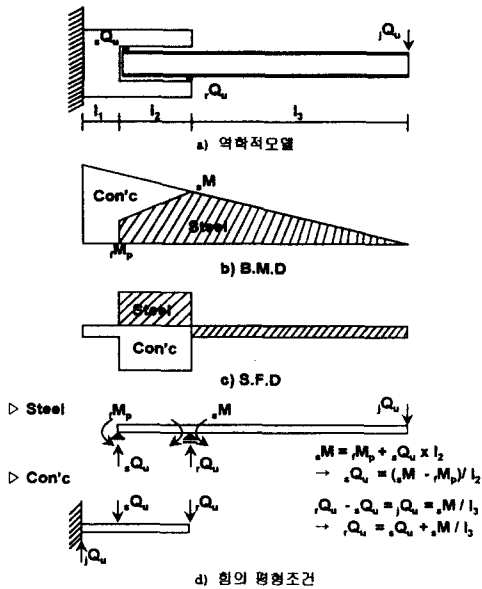
2.2 역학적 모델

혼합구조 보에 대한 기존연구^{1),2),3)}에서 도입한 보의 전단저항기구에 대한 역학적인 모델은 그림 1과 같으며, RC-S 접합부구간의 RC단면과 철골단면에 각각 작용하는 전단집중내력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$jQ_u = \min(M_n / (l_1 + l_2 + l_3), sM / l_3)$$

$$rQ_u = \frac{[jQ_u (l_2 + l_3) - rM_p]}{l_2}$$

$$sQ_u = rQ_u - jQ_u$$



따라서 rQ_u 와 sQ_u 가 작용하는 위치에 필요한 전단집중보강근량은

$$\text{RC 측} : n_1 = \frac{sQ_u}{w_a \times w \sigma_y \times 2}$$

$$\text{철골 측} : n_2 = \frac{rQ_u}{w_a \times w \sigma_y \times 2}$$

M_n : RC 단면의 공칭강도

sM : 철골의 전소성모멘트

rM_p : 철골의 구속모멘트

w_a : 전단집중보강근의 단면적

$w \sigma_y$: 전단집중보강근의 항복강도

그림 1 복합보의 역학적 모델

3. 실험

실험체는 그림 2와 같이 캔틸레버 보 형식으로 실험크기의 1/2로 축소하여 제작하였고, RC-S 접합부에서의 전단거동 및 응력전달기구를 고찰하고자 하였다. 기존 연구를 토대로 전단집중보강근으로서의 일반철근과 PC 강봉, 전단집중보강근의 양, 전단집중보강근의 직경 등을 실험변수로 계획하였으며, 실험체 일람표는 표 1에 나타내었다.

실험체에 사용된 콘크리트는 고강도인 400kg/cm^2 을 사용하였고, 철골은 SWS490, 철근은 SD40의 철근 및 고강도 PC강봉을 사용하였다. 실험체에 사용된 재료시험결과는 표 2에 나타내었다.

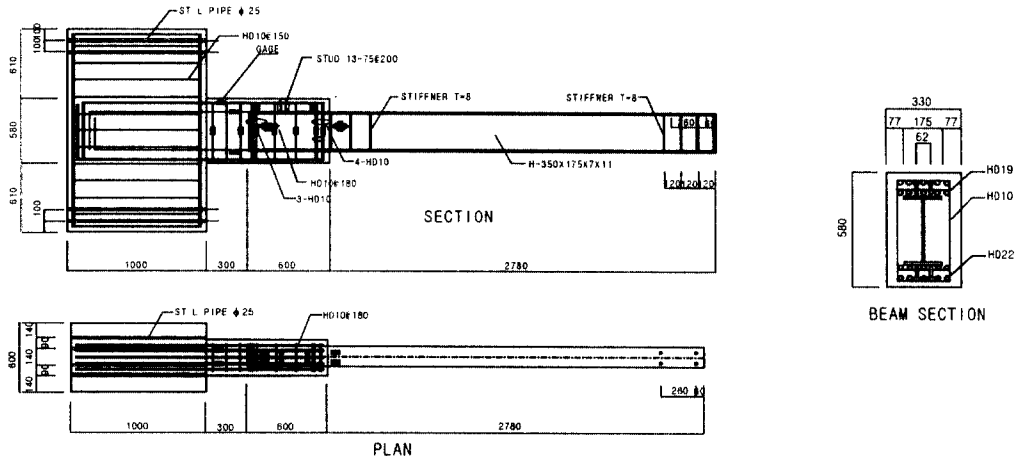


그림 2 GA1-a 실험체의 형상 및 배근상황

표 1 실험체 일람표

구 분	표준형	전단집중보강근		
	GA1-a	GC1	GC2	GC3
보 단면	330×580			
철골	H-350×175×7×11			
f'_c (kg/cm ²)	423	455	413	413
RC 부 길이	300 (0.52D)			
철골매립길이	600 (1.75H)			
인장철근	5-D22+5-D19			
철골측 전단집중보강근	4-D10	2-D10	3-U6.4	2-D16+1-D10
RC측 전단집중보강근	3-D10	1-D10+1-D6	2-U6.4	1-D16
접합구간 전단보강근	2-D10 @180	1-D10 @280		
Stud Shear Connector	6- Stud ϕ 13	6- Stud ϕ 13		

표 2 철골 및 철근 인장실험 결과

구 분	항복강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	연신율 (%)	
철근	U6.4	13900	14833	27.1
	D10	3028	4794	22.5
	D13	3984	6000	25.0
	D16	4266	6250	22.7
	D19	4445	6523	20.4
	D22	4085	6206	22.2
철골	플랜지 (t=11mm)	3297	4845	29.0
	웹 (t=7mm)	3712	5082	25.3
Stud Bolt (ϕ 13)	4163	5399	9.2	

4. 실험결과 및 분석

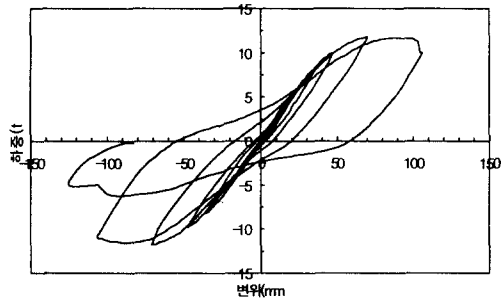
4.1 내력 및 하중-변위곡선

각 실험체의 내력 및 파괴형상을 표 3에 나타내었다. 대부분의 실험체가 변위각 $R=1/100$ 에서 철골매립단부에서 전단균열이 발생하기 시작하였고, 그 후 하중이 증가하면서 45도 방향의 사인장균열로 확산되면서 최대하중에 이르렀으며, 최종파괴모드는 실험체 모두 전단파괴에 의해 결정되었다. 전단집중보강근량을 표준형의 1/2로 줄여 배근한 GC1실험체의 경우, 표준형의 약 80%의 내력을 보였으나, 최대내력 이후의 거동은 표준형의 경우, $R=1/33$ 까지 연성적 거동을 나타내는 반면, GC1실험체의 경우에는 최대내력 발휘 후 $R=1/50$ 에서 내력저하로 변형능력이 현저히 저하되었다. GC2, GC3실험체는 표준형과 거의 유사한 거동을 나타내었다. 다만, 최대내력 이후 내력저하시점이 표준형($R=1/33$)에 비해 다소 불리한 것으로 나타났다. 실험체의 하중-변위 곡선은 그림 3에 나타내었다.

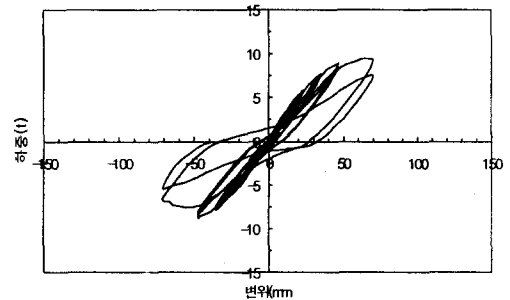
표 3 실험 결과

실험체명	예상값(Q_u): (단위 : t)							실험값(Q_e)(단위 : t)		Q_e/Q_u	파괴모드
	cQ_u	sQ_u	jQ_{u1}	jQ_{u2}	jQ_{u3}	jQ_{u4}	jQ_{u5}	정(+)	부(-)		
GA1-a	17.4	11.2	11.8	13.6	12.5	8.3	49.2	11.8	11.8	1.42	전단파괴
GC1	17.6	11.2	11.7	13.5	12.2	6.9	49.2	9.4	8.7	1.36	전단파괴
GC2	17.3	11.2	11.0	12.8	11.6	9.3	49.2	10.4	9.5	1.12	전단파괴
GC3	17.3	11.2	11.0	12.8	11.6	8.5	49.2	11.0	10.6	1.29	전단파괴

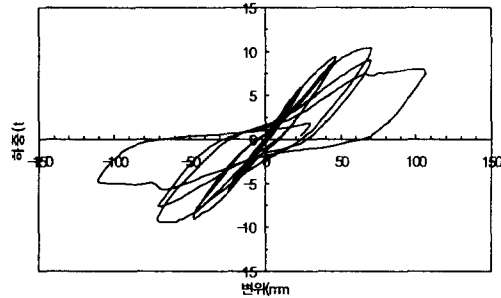
* cQ_u 는 극한강도 설계법⁶⁾에 의한 내력값을 적용하였음.



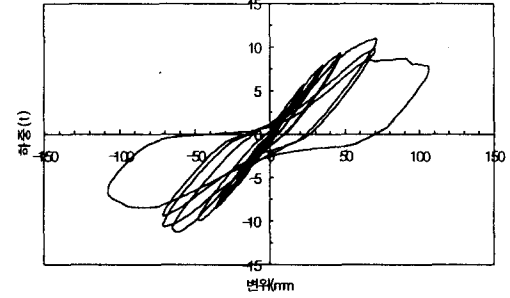
a) GA1-a 실험체의 하중-변위 이력곡선



b) GC1 실험체의 하중-변위 이력곡선



c) GC2 실험체의 하중-변위 이력곡선



d) GC3 실험체의 하중-변위 이력곡선

그림 3 실험체의 하중-변위 이력곡선

4.2 결과분석

4.2.1 PC강봉과 일반철근의 차이

전단집중보강근으로 일반철근을 사용한 GA1-a 실험체와 고강도 PC강봉을 사용한 GC2 실험체에 대하여 전단집중보강근의 내력을 거의 동일하게 하여 실험을 진행하였고 이를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 GA1-a 실험체는 최대내력시 전단집중보강근이 항복내력에 도달하였고, GC2 실험체는 아직 항복내력에 도달하지 않았다. 이로부터 일반철근을 사용한 GA1-a 실험체가 전단력을 더 많이 부담하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 이는 탄성구간에서 동일한 외력이 작용할 경우, 전단집중보강근으로 일반철근을 사용한 실험체가 보다 적은 변형을 일으켜 구조부재의 처짐 및 균열에 유리함도 알 수 있다.

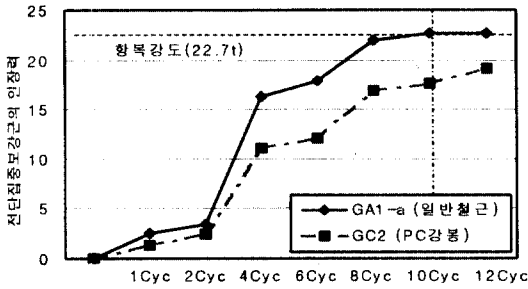


그림 4 전단집중보강근에 작용하는 인장력

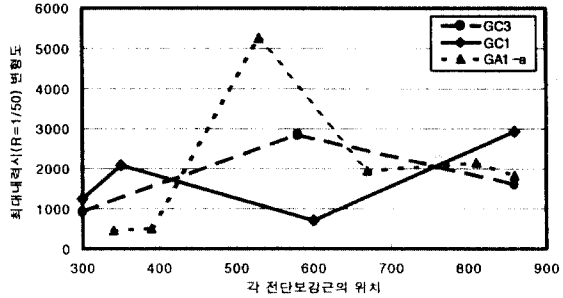


그림 5 최대내력시 전단보강근의 변형도

4.2.2 전단집중보강근 양의 효과

전단집중보강근의 양을 GA1-a 실험체의 1/2로 줄여 배근한 GC1 실험체의 경우, 부재각 R=1/75에서 최대내력에 도달한 후, 부재각 R=1/50에서 최종 파괴에 이르는 등 GA1-a 실험체에 비해 소성 변형능력이 불리하고 에너지 소산능력이 취약한 이력거동을 나타내었다. 그러나 내력의 측면에서는 GA1-a에 비해 정·부방향의 내력이 각각 약 80%와 74%를 발휘하고 있어 전단집중보강근의 양에 비례하지는 않는 것으로 나타났다. 이를 기존 연구에서는 강도가 부족할 경우 접합부 내부로의 재분배에 의해 내력이 증가하는 것으로 분석하고 있으나, GC1 실험체는 중앙부에 전단보강근을 1개밖에 배근하지 않았으므로 재분배에 의한 내력증가로 볼 수는 없을 것으로 판단된다. 그리고 최대 내력시 전단보강근들의 변형도가 상대적으로 작기 때문에 충분한 응력전달 역할을 한 것으로 보기는 어려운 점이 있다. 이는 모멘트와 전단력이 크게 작용하는 부재의 단부에서 주근이 보의 중앙방향으로 충분한 정착길이를 확보하기 어려운 점이 있어, 많은 균열이 발생하여 전단보강근이 충분한 역할을 하기 어려웠던 것으로 사료된다. 또한 부재의 단부방향의 안쪽에 사용한 전단집중보강근은 변형도가 상대적으로 낮게 나타나 기존의 방법에 의해서 설계할 경우 많은 양의 철근이 사용될 것으로 사료된다.

4.2.3 전단집중보강근 크기의 효과

향후 장스팬의 대형보의 사용에 대비하여 전단집중보강근으로 D16 철근의 적용가능성을 확인하고자 GC3 실험체를 제작하였다. 실제로 일본에서 PC 강봉을 사용한 이유는 많은 양의 철근을 RC-S 접합부 단부에 집중적으로 사용하여야 하는 문제를 해결하고자 함이었다. 그러나 이를 일반철근으로 대체할 경우 보다 굵은 철근을 전단집중보강근으로 사용하여야 할 경우가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 실험을 진행한 결과 전단집중보강근의 크기의 차이가 표 3 및 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 내력 및 거동에 있어서 표준형 실험체와 거의 유사함을 알 수 있었다.

4.2.4 rQ_u, sQ_u 값의 고찰

GA1-a 실험체와 GC 시리즈 실험체에서 철골의 구속을 위해 철골 플랜지에 용접된 스티드의 개수는 실험체 모두 동일하므로 우력모멘트(rM_p)를 이론치로 가정하고 기존 연구의 역학적 모델과 이에 따른 내력산정식을 적용하였다. 그리고 이론식에 의한 rQ_u, sQ_u 값과 실험값을 비교하여 표 4에 나타내었다. 표 4에서 보면 실험값과 이론값의 차이가 많음을 알 수 있다. 이는 기존 연구에서 전단집중보강근이 철골의 지레작용에 의한 전단력을 전달한다고 하는 가정과 다소 불일치하고 있음을 확인할 수

표 4 실험결과에 따른 rQ_u , sQ_u 값의 산출

실험체명	실험 최대하중		설계식			rQ_u (철골측)		sQ_u (RC측)		$rQ_u(\text{실험})/$ $rQ_u(\text{이론})$	$sQ_u(\text{실험})/$ $sQ_u(\text{이론})$
	정 하중	부 하중	iM_p (이론)	rQ_u (이론)	sQ_u (이론)	정 (실험)	부 (실험)	정 (실험)	부 (실험)		
GA1-a	11.8	11.8	15.3	22.7	17.7	40.1	40.1	27.5	27.5	1.77	1.55
GC1	9.4	8.7	15.3	11.4	8.2	26.4	22.4	16.3	13.1	2.31	1.99
GC2	10.4	9.5	15.3	23.4	15.6	32.1	27.0	21.0	16.8	1.37	1.35
GC3	11.0	10.6	15.3	21.6	15.9	35.5	38.3	23.8	21.9	1.64	1.50

있다. 이는 RC-S접합부에서의 전단파괴가 사인장균열에 의한 파괴이므로 내부측의 전단보강근도 전단에 함께 저항을 하는 것으로 판단된다. 실험에 의한 rQ_u 값을 고려해 볼 때, 전단보강근의 인장항복 내력으로 지레작용에 의한 내력에 부족하다. 이는 RC-S접합부에서의 전단내력에 콘크리트의 내력도 기여하고 있는 것으로 보인다. 따라서, 철골로부터 입력된 전단력에 대해 전단보강근과 콘크리트가 전단저항에 분담하여 저항하는 것으로 사료된다.

6. 결론

이상과 같이 단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 혼합구조 보에 대한 실험을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 일본식 혼합구조 보 시스템에서 전단집중보강근으로 사용하고 있는 PC강봉보다는 일반철근이 내력과 성능면에서 더 우수하다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 실험체의 강도는 전단집중보강근의 양에 비례하여 감소하지는 않으며, 시공상 전단집중보강근으로 D16을 사용하였을 때에도 충분한 강도의 발현 및 연성거동 등을 확인할 수 있었다.
- 3) 혼합구조 보의 설계에서 rQ_u , sQ_u 가 작용하는 부위의 전단강도는 전단집중보강근과 순수 콘크리트가 함께 저항하는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 이상과 같은 실험결과를 기존연구에서 제시하고 있는 역학적 모델에 의한 거동과 비교하였을 때, 실제의 거동은 차이가 크게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 川端一三・成原弘之・官崎直志, “端部RC造中央部S造の複合構造梁構造實驗と實際施工”, 1992. 12
2. 淺山長生・田中國彦・成原弘之・網于眞一・川端一三・泉滿, “下端部RC造中央部S造の複合構造梁の實驗” -その1. 實驗の概要
3. 淺山長生・田中國彦・成原弘之・網于眞一・川端一三・泉滿, “下端部RC造中央部S造の複合構造梁の實驗” -その2. 應力傳達機構
4. 秋山 雄, “철골주각의 내진설계”, 技報堂, pp.164-182, 1985
5. 일본건축학회, “철골철근 콘크리트구조 계산기준 동해설”, 1987
6. 대한건축학회, “극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 설계”, 1993