

부착 또는 비부착된 탄소판으로 긴장 보강한 RC보의 보강성능

Strengthening performance of RC beams strengthened by bonded or unbonded prestressed CFRP laminates

박 종 섭* 박 영 환** 유 영 준*** 정 우 태*** 강 재 윤*

Park, Jong Sup Park, Young Hwan You, Young Jun Jung, Woo Tai Kang, Jae Yoon

ABSTRACT

This study investigates the flexural behavior and strengthening performance of RC beams strengthened by prestressed CFRP laminates through static bending tests. Tests on RC beams strengthened with prestressed CFRP laminates were carried out for both cases where the CFRP laminates were bonded or not and the corresponding effects on the strengthening performances of RC beams were examined. Experimental results revealed that RC beams strengthened with prestressed CFRP laminates presented increased crack load and yield load according to the level of prestress. Premature debonding occurred before the RC beam strengthened with bonded prestressed CFRP laminates reaches the maximum load, and the specimen presented similar behavior to the one exhibited by the specimen with unbonded laminates.

1. 서론

1960년대 이후 노후화된 교량의 보강에서 강판접착공법은 세계적으로 널리 사용되던 공법이었다. 그러나 강판접착공법은 부식, 무거운 중량, 취급의 어려움 등의 문제점을 갖고 있기 때문에 근래에는 FRP가 강판을 대체하는 재료로서 크게 각광받고 있으며 최근 노후 교량 보강의 대세는 FRP를 이용한 보강공법이 차지하고 있다(Täljsten 2004). 지난 수 십년간 사용된 FRP를 이용한 구조물의 보강은 대부분 콘크리트 인장면에 FRP를 부착하는 형태의 부착공법(Externally Bonded Reinforcement: EBR)이었다. FRP 부착공법은 RC 보의 휨강도 증가에는 효과적이지만 FRP의 박리, 부착파괴 등과 같은 조기파괴의 문제와 구조시스템이 취성적인 거동을 하게 되는 문제점이 있다(EI-Hacha 2000).

FRP를 이용하여 구조물에 긴장력을 도입하면 주인장철근의 응력을 경감시킬 수 있을 뿐만 아니라, 구조물의 균열폭과 휨변형도 감소시킬 수 있다. 또한 FRP로 긴장된 구조물은 피로 거동 특성도 좋아지게 되는 장점이 있다(Stoeklin and Meier 2003). 긴장을 위해 사용하는 적절한 정착시스템은 FRP의 부착파괴로 인한 시스템의 취성적인 거동도 방지할 수 있게 된다. 또한 구조물에 긴장력이 도입됨에 따라 FRP는 추가되는 활하중뿐만 아니라 고정하중도 일부 분담할 수 있게 되어 고가의 FRP를 효

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원
*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

울적으로 활용할 수 있다(EI-Hacha 2000). 이처럼 FRP를 통해 긴장력을 도입하는 경우가 단순히 FRP를 부착한 경우보다 여러 가지면에서 우수한 역학적 특성을 나타내지만 정착장치의 설치, FRP 프리스트레싱 작업과 같은 추가 공정으로 인해 부착공법에 비해 시공성이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 적절한 정착장치를 통해 FRP를 비부착으로 시공하는 경우에는 콘크리트의 면처리, 부착, 양생의 공정을 제거할 수 있기 때문에 시공성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 CFRP 판으로 외부 긴장 보강된 RC 보에 대한 휨실험을 통해 CFRP 판부착공법으로 보강된 RC 보와 CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보의 성능을 비교하였으며, 비부착 CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보에 대한 추가실험을 통해 CFRP 판을 부착한 경우와 부착하지 않은 경우의 휨거동과 보강성능 차이에 대해 비교, 고찰하였다.

2. 실험계획 및 실험방법

CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보의 거동 특성을 살펴보기 위한 실험에는 보강되지 않은 CONTROL 실험체를 포함한 총 8개의 실험체를 사용하였다. 실험체의 제원과 단면치수는 그림 1과 같으며, 실험체 제작에 사용된 재료의 물성은 표 1에 나타내었다. 보강된 실험체 중 하나는 EBR로 보강된 실험체이며, 나머지는 그림 2와 같이 부착된 CFRP 판으로 긴장 보강한 실험체와 비부착 CFRP 판으로 긴장 보강한 실험체이다. 각 실험체별 보강방법과 CFRP 판의 인장강도에 대한 프리스트레스 비는 표 2와 같다.

표 1 사용재료의 물성

재료	물성	
콘크리트	압축강도(MPa)	28.3
철근(HD10)	항복강도(MPa)	510
	인장강도(MPa)	627
철근(D13)	항복강도(MPa)	512
	인장강도(MPa)	626
CFRP 판 (폭 50mm, 두께 1.4mm)	인장강도(MPa)	2482.5
	탄성계수(GPa)	167.3
	극한변형률(%)	1.59

표 2 실험변수 및 보강방법

실험체명	보강방법	도입긴장력(CFRP 인장강도에 대한 비, %)
CONTROL	무보강 기준실험체	-
CPL-50-BOND	CFRP 판부착공법	-
PL-NF-B-0	부착 CFRP판에 의한 외부 긴장보강	0(0.7)*
PL-NF-B-50		35(34.9)*
PL-NF-B-70		50(48.0)*
PL-NF-N-0	비부착 CFRP판에 의한 외부 긴장보강	0(0.1)*
PL-NF-N-50		35(35.5)*
PL-NF-N-70		50(51.2)*

* : 실제 도입된 긴장력

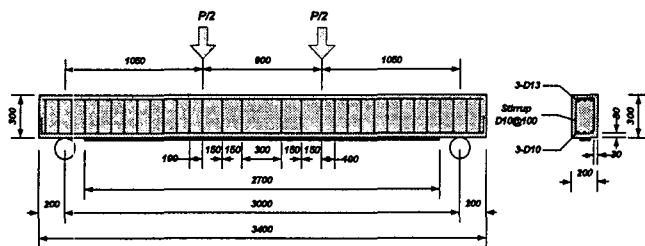


그림 1 실험체의 단면치수 및 제원(mm)

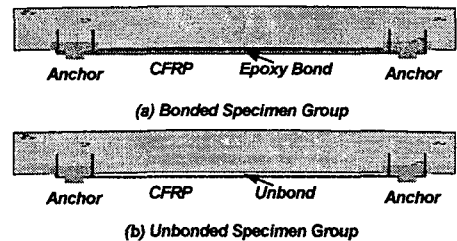


그림 2 CFRP 긴장 보강 실험체

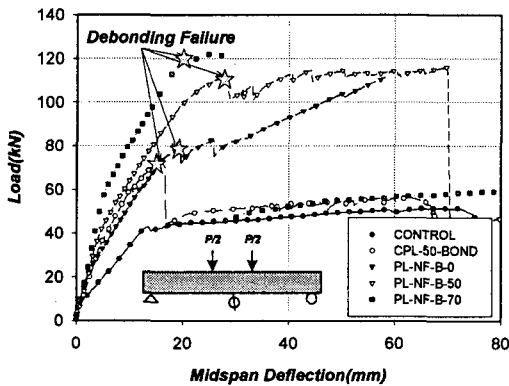
모든 실험체는 980kN 용량의 UTM을 사용하여 4점 휨 재하로 실험체 파괴시까지 하중을 재하였다. 하중은 변위제어로 초기 15mm 변위 발생시까지 초당 0.02mm의 속도로 재하하고, 15mm 이상의 변위가 발생한 시점부터 파괴시까지의 초당 0.05mm의 속도로 재하였다.

3. 실험결과 및 분석

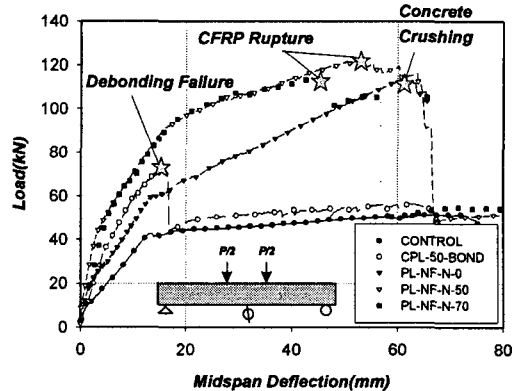
각 실험체의 균열, 항복하중 및 최대하중은 표 3에 나타냈으며, 그림 3에는 부착실험체 그룹과 비부착 실험체 그룹별로 각각 하중-변위곡선을 나타냈다. 부착된 CFRP 판으로 긴장 보강된 PL-NF-B-70 실험체는 무보강 실험체보다 균열하중은 7배가 증가하였으며, 항복하중은 2.79배가 증가하였다. CFRP 판으로 긴장 보강된 실험체는 모두 프리스트레스 크기에 따라 균열하중 및 항복하중이 증가하는 것으로 나타났다. PL-NF-N-70 실험체를 제외하고는 부착 실험체 그룹과 비부착 실험체 그룹간의 균열하중 증가비율은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 항복하중의 경우에는 비부착 실험체인 PL-NF-N-0 실험체가 부착 실험체인 PL-NF-B-0 보다 17%가 작은 것으로 나타났으며, PL-NF-N-50 실험체는 부착 실험체인 PL-NF-B-50 실험체 보다 8%가 낮은 것으로 나타났다.

표 3 균열, 항복하중 및 극한하중

실험체명	균열하중 (P_{cr} , kN)	$P_{cr}/$ $P_{cr,control}$	항복하중 (P_y , kN)	$P_y/$ $P_{y,control}$	극한하중 (P_{cr} , kN)	$P_u/$ $P_{u,control}$	항복변위 (D_v , mm)	극한변위 (D_u , mm)	연성 (D_u/D_v)
CONTROL	9.0	-	42.9	-	51.79	-	13.5	72.04	5.34
CPL-50-BOND	20.1	2.23	61.0	1.42	73.24	2.23	10.52	16.0	1.52
PL-NF-B-0	23.0	2.56	73.5	1.71	111.71	2.56	16.12	57.96	3.60
PL-NF-B-50	41.3	4.59	99.3	2.31	116.44	4.59	19.92	69.78	3.50
PL-NF-B-70	63.4	7.04	119.7	2.79	124.29	7.04	19.72	28.96	1.47
PL-NF-N-0	21.6	2.40	61.0	1.42	113.83	2.40	13.94	61.56	4.42
PL-NF-N-50	44.7	4.97	91.1	2.12	123.04	4.97	16.06	53.40	3.33
PL-NF-N-70	46.3	5.14	94.2	2.20	114.41	5.14	17.20	47.18	2.74



(a) 부착실험체 그룹



(b) 비부착실험체 그룹

그림 3 하중-변위 곡선

표 3에 따르면 PL-NF-N-70 실험체를 제외하고는 부착실험체 그룹에 비해 비부착실험체 그룹의 보강효과가 더 높게 나타나고 있다. PL-NF-B-0는 무보강 실험체보다 최대하중이 2.16배 큰 것으로 나타났지만 CFRP 판이 부착되지 않은 PL-NF-N-0는 무보강 실험체보다 최대하중이 2.20배 큰 것으로 나타났다. PL-NF-B-50 실험체의 경우에는 무보강 실험체에 대한 최대하중비가 2.25로 나타났으며, PL-NF-N-50 실험체는 무보강 실험체에 대한 최대하중비가 2.38로 나타나 부착실험체에 비해 보강성능이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 부착과괴가 발생하기 이전인 사용하중 상태에서 부착실

험체 그룹의 보강효과가 높았던 것과는 다른 결과로서 부착실험체 그룹의 실험체는 부착파괴시에 발생하는 충격에너지가 CFRP 판의 하중 저항 능력을 감소시키기 때문인 것으로 판단된다.

최종 파괴시의 변위(D_u)를 인장철근 항복시의 변위(D_y)로 나눈 것을 연성으로 정의하면 무보강 실험체의 연성은 5.34이다. EBR로 보강된 CPL-50-BOND은 조기 부착파괴로 인해 연성이 1.52로 낮아지지만 정착장치에 의해 CFRP 판을 고정시킨 PL-NF-B-0과 PL-NF-N-0 실험체의 연성은 각각 3.60과 4.42로 나타났다. CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보에서는 프리스트레스가 증가할수록 연성은 감소하는 것으로 나타났으며, 부착된 실험체들은 부착되지 않은 실험체보다 연성이 낮은 것으로 나타났다.

그림 3(a)에서와 같이 부착실험체 그룹은 모두 부착파괴가 발생했으며, 부착파괴시에 순간적으로 하중이 감소하지만 부착파괴 이후에는 비부착 실험체 그룹과 유사한 거동을 보였다. 이러한 원인은 부착파괴 발생 이전에는 경간 중앙에서 최대값을 나타내던 CFRP 판의 변형률이 부착파괴가 발생하면서 비부착실험체 그룹에서와 같이 경간 중앙의 CFRP 판 변형률이 최대값에서 평균값으로 낮아지면서 하중이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 3(b)에서 비부착실험체 그룹은 인장철근 항복 이후에도 꾸준히 하중 저항능력을 발현하다가 최종적으로 콘크리트의 압축파괴 또는 CFRP 판의 파단시에 최대하중을 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보의 보강성능 및 거동 특성을 규명하기 위한 휨 실험을 수행하였으며, 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보는 프리스트레스의 크기에 따라 EBR로 보강된 RC 보에 비해 최대하중이 53%에서 70%까지 증가한다. 또한 CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보의 연성은 프리스트레스의 크기가 증가할수록 감소한다.

(2) 부착된 CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보는 모두 최종파괴에 앞서 부착파괴가 발생하며, 부착파괴 이후에는 비부착된 CFRP 판으로 긴장 보강된 RC 보와 유사한 거동을 나타낸다. 부착실험체 그룹은 동일한 프리스트레스가 도입된 비부착 실험체 그룹에 비해 최대하중이 낮은 것으로 나타났으며, 이러한 원인은 부착파괴시에 발생하는 충격에너지에 의한 손상 때문인 것으로 추정된다.

CFRP 판을 부착하지 않는 경우에는 콘크리트 면처리 및 에폭시 부착, 양생의 작업공정을 생략할 수 있을 뿐만 아니라 부착파괴에 의한 충격도 발생하지 않기 때문에 콘크리트 보강에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Täljsten B., 2004, "FRP strengthening of concrete structures: new inventions and applications", *Prog. Struct. Engng Mater.*, pp. 162-172
2. El-Hacha R., 2000, "Prestressed CFRP sheets for strengthening concrete beams at room and low temperatures", PhD Thesis, Queen's University, Department of Civil Engineering, Kingston, Ontario.
3. Stoecklin I. and Meier U., 2003, "Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips", *Proceeding of the sixth international symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures(FRPRCS-6)*, Singapore, pp. 1321-1330.
4. Wu Z., Matsuzaki T., Yokoyama K. and Kanda T., 1999, "Retrofitting method for reinforced concrete structures with externally prestressed carbon fiber sheets", *Proc. of 4th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-4)*, ACI SP-188, American Concrete Institute, Detroit, pp. 751-765.