

외부 부착형 프리스트레스트 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨 거동

Flexural Behavior of RC beams Strengthened with Externally Bonded Prestressed CFRP Strips

유 영 찬* 최 기 선** 박 영 환* 박 종 섭*** 김 금 환****
You, Young Chan Choi, Ki Sun Park, Young-Hwan Park, Jong-Sup Kim, Keung Hwan

ABSTRACT

Experimental study has been performed in order to investigate the behavior of RC beams strengthened with externally bonded prestressed CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) strips. A total of 7 specimens have been manufactured of which specimens strengthened with bonded CFRP strips considering the level of prestress as experimental variable, and a specimen with simply bonded CFRP strips.

The following phenomena have been observed through the experimental results. The specimen with simply bonded CFRP strips failed below 50% of its tensile strength due to premature debonding. On the other hand, all the specimens strengthened with prestressed CFRP strips showed sufficient strengthening performance up to the ultimate rupture load of the CFRP strips. Also, it was observed that the cracking loads and yield loads of the strengthened beams were increased proportionally to the prestress level, but the maximum loads were nearly equal regardless of the prestress level.

1. 서 론

탄소섬유판(CFRP strips)을 단순 부착하여 보강하는 공법은 일반적으로 조기 부착파괴가 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 이에 따라 정착장치를 설치하여 부착파괴를 방지하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 최근에는 보다 적극적인 방법으로 탄소섬유판에 프리스트레스트를 도입하여 보강하는 공법이 선진국에서 개발되어 상용화되고 있다. 본 공법은 고정하중에 의해 과도한 균열이나 처짐이 발생된 부재의 사용성 회복이 가능할 뿐만 아니라, 탄소섬유판의 여분의 재료강도를 프리스트레스트에 이용함으로써 내하력의 증진은 물론 재료강도(tensile strength)를 100% 활용할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 탄소섬유판을 이용한 프리스트레스트 보강공법의 실용화를 목적으로 프리스트레스트 도입량에 따른 보강된 부재의 특성과 및 보강성능에 영향을 미치는 변수에 대한 검증실험을 실시함으로써 프리스트레스트 탄소섬유판에 의해 보강된 RC부재의 보강설계를 위한 기초자료를 구축하고자 한다.

* 정희원, 한국건설기술연구원, 수석연구원
** 정희원, 한국건설기술연구원, 연구원
*** 정희원, 한국건설기술연구원, 선임연구원
**** 정희원, 한국건설기술연구원, 선임연구부장

2. 실험

2.1 재료 시험

본 연구에서는 보강될 콘크리트의 성능저하를 모사하기 위하여 축소모형 RC실험체의 제작시, 설계 압축강도를 18.0 MPa 정도의 레디믹스트 콘크리트로 계획하였다. 철근은 인장 및 압축주근으로 D10, D13철근을 사용하였으며, 전단철근은 D10을 사용하였다. 보강에 사용된 탄소섬유판은 M사에서 개발된 고강도 제품을 사용하였다. 각 재료의 역학적 특성을 나타내면 표 1 및 2와 같다.

표 1. 에폭시 수지의 물성

에폭시 종류	인장강도 (MPa)	인장전단 접착강도 (MPa)	사용가능 시간 (min)
접착제	33.5	4.3	26

표 2. 탄소섬유판의 물성

종 류	설계 두께 (mm)	인장강도 (MPa)			탄성계수 (GPa)		파단 변형률 (μ)
		규격치	실험평균	$X-3\sigma_n$	규격치	실험치	
CFRP	1.5	1,500	2,167	1,656	17.0	17.3	12,525

2.2 실험체 계획

실험체의 단면치수는 200×300mm로 인장축과 압축축 피복두께를 30mm로 하였으며, 지지간 거리는 2,400mm, 전체 실험체 길이는 2,700mm로 계획하였다. 또한, 휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 철근을 100mm 간격으로 전단배근하였다. 대표적인 실험체의 형상 및 치수를 나타내면 그림 1과 같으며, 각 실험체의 변수를 정리하여 나타내면 표 3과 같다.

표 3 실험체 일람표

시험체 명	보강재 형상	보강상세	프리스트레스 양 f_{fp}/f_{fu} (%)	비고
Control	-	-	-	기준 실험체
NB1	CFRP 폭 : 50mm CFRP 두께 : 1.5 mm 부착길이 : 1,900 mm	단순 부착	-	단순부착 보강실험체
PB1-0R		부착형 프레스	0	프리스트레스 보강 실험체
PB1-2R			20	
PB1-4R			40	
PB1-6R			60	
PB1-7R			70	

* f_{fp} : 프리스트레스 도입율, f_{fu} : 탄소섬유판의 극한 인장강도

2.3 프리스트레싱 계획

탄소섬유판에 대한 프리스트레스의 도입은 그림 2에 나타난 바와 같이 실험체를 뒤집은 상태에서 실험체의 단부에 가력프레임을 설치하고, 실험체를 반력대로 하여 직접적으로 프리스트레스를 도입하였다. 탄소섬유판에 대한 프리스트레스의 양은 프리스트레스를 도입하지 않은 경우를 0%로 하고, 재료의 인장강도를 기준으로 하여 각각 20, 40, 60 및 70%를 도입한다. 부착 시스템은 탄소섬유판에 프리스트레스를 도입한 후, 에폭시 수지를 이용하여 실험체에 부착하였다.

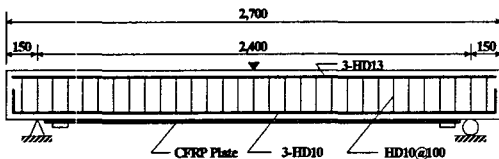


그림 1 시험체 형상 및 치수

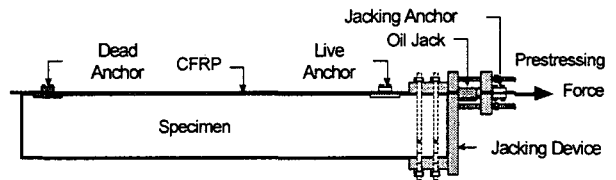
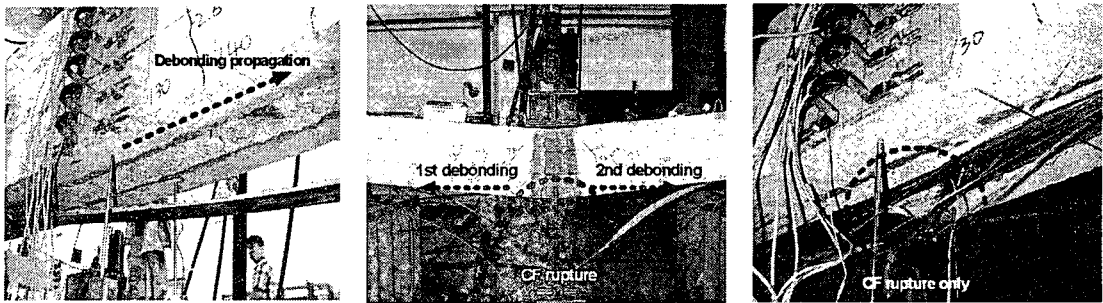


그림 2 축소모형 휨 실험체 프리스트레스 도입 과정

3. 실험 결과 분석

3.1 파괴 양상

탄소섬유판을 지간길이의 80%로 단순 부착하여 보강한 실험체는 그림 3에서 보는 바와 같이 중앙 부에서 시작된 박리가 단부로 급격하게 진행되면서 최종파괴되었다. 이에 대하여, 탄소섬유판 인장강도의 0~60%까지 프리스트레스를 도입하고 부착하여 보강한 실험체에서는 6,000~7,000 μ 범위에서 일차적으로 박리가 발생한 후, 탄소섬유판이 파단될 때까지 비부착 거동을 나타내었다. 한편, 재료 인장강도의 70%의 프리스트레스를 도입하여 보강한 실험체는 박리 발생 없이 순수 탄소섬유판의 파단에 의해 최대내력에 도달하였다. 본 실험결과로부터 부착형 프리스트레스 보강시스템에서는 프리스트레스의 도입량에 따라 보강된 부재의 파괴양상이 변화되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 단순부착 실험체 (b) 프리스트레스 실험체(60%이하) (c) 프리스트레스 실험체(70%)

림 3 탄소섬유판을 이용한 부착형 보강시스템의 긴장력에 따른 파괴 양상

3.2 보강 성능

탄소섬유판으로 보강된 RC보에 대한 실험결과를 정리하여 나타내면 표 4과 같다. 위에서 언급한 바와 같이 탄소섬유판을 단순 부착하여 보강한 실험체는 탄소섬유판 재료강도의 약 50%에서 박리가 발생되어 충분한 보강효과가 발휘되지 않는 것으로 나타났다. 이에 대하여, 탄소섬유판에 프리스트레스를 도입하여 보강된 실험체는 프리스트레스 양에 따라 균열하중 및 항복하중이 비례적으로 증가되었으며, 공칭모멘트시($\epsilon_c = 0.003$)의 강도도 비례적으로 증가되는 것으로 나타나, 충분한 보강성능을 발휘하는 것으로 파악되었다. 더욱이, 정착장치를 사용한 실험체는 모두 탄소섬유판의 파단강도까지 도달된 것이 확인되어, 프리스트레스 양에 관계없이 실험체의 최대하중은 거의 같은 것으로 나타났다.

표 4 실험결과 일람표

(하중 : kN, 변위 : mm)

실험체명	Cracking		Yield		Debonding				Nominal($\epsilon_c=0.003$)			Maximum				ϵ_{fi}	ϵ_{fm}	파괴양상
	P_{cr}	δ_{cr}	P_y	δ_y	P_d	δ_d	ϵ_{cd}	ϵ_{fd}	P_n	δ_n	ϵ_{fn}	P_{max}	δ_u	ϵ_{cu}	ϵ_{fu}			
Control	18.2	-	40.4	-	-	-	-	-	4.70	19.28	-	-	33.6 ²⁾	4.913 ¹⁾	-	-	-	휨-압축
NB1	13.7	0.64	56.3	7.2	77.0	15.40	3,399	6,852	7.46	13.66	6,477	7.70	15.4	3,399	6,852	-	6,852	박리
PB1-0R	24.5	1.20	55.4	6.54	80.5	16.20	2,277	7,002	8.18	21.60	7,109	12.15	55.8	3,313 ¹⁾	12,218	0	12,218	박리-파단
PB1-2R	26.4	1.28	71.6	7.16	105.0	18.52	2,899	8,309	9.72	21.02	7,307	12.30	49.3	3,451 ¹⁾	10,317	2,367	12,684	박리-파단
PB1-4R	42.4	1.74	85.2	5.88	120.1	16.50	2,571	6,882	-	-	-	12.52	32.4	측정실패	7,239	5,011	12,250	박리-파단
PB1-6R	51.8	1.7	100.5	8.34	119.6	14.66	2,784	6,023	10.86	15.6	4,967	12.28	22.3	4,498	6,098	7,410	13,508	박리-파단
PB1-7R	61.9	2.78	115.5	8.48	-	-	-	-	-	-	-	12.65	11.3	2,830	4,987	8,069	13,056	파단

ϵ_{fi} : 긴장시 탄소섬유판 변형률

ϵ_{fm} : 탄소섬유판 최대변형률($\epsilon_{fi} + \epsilon_{fo}$)

ϵ_c : 콘크리트 최대변형률

1) : 측정된 콘크리트 최대 압축변형률

2) : 기준실험체의 측정된 콘크리트 최대 압축변형률에 대한 처짐

4.3 하중-변위 곡선

프리스트레스 양에 따른 부착형 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내면 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 프리스트레스 양이 증가할수록 균열하중, 항복하중 및 박리하중은 증가하지만, 박리발생 이후의 변형능력은 감소하는 것을 알 수 있다. 프리스트레스 양에 따른 거동의 차이를 분석해 보면, 탄소섬유판 재료강도의 60% 이하로 프리스트레스를 도입한 부착형 실험체는 2회에 걸친 탄소섬유판의 박리로 인하여 하중-변위 곡선에서 일시적인 하중감소 현상이 관측된다. 박리가 발생된 후에는 비부착시스템으로 전환되기 때문에 강성이 감소하고, 최대하중까지 변위가 급격히 증가한다. 이에 대하여, 재료강도의 70%로 긴장력을 도입한 실험체는 탄소섬유판의 파단까지 박리가 발생하지 않기 때문에 콘크리트와 합성을 유지한 상태에서 최종파괴에 도달한다. 따라서, 부분적인 박리가 발생된 실험체에 비하여 처짐 및 균열 폭이 감소되며 최대내력은 증가되는 것으로 나타났다.

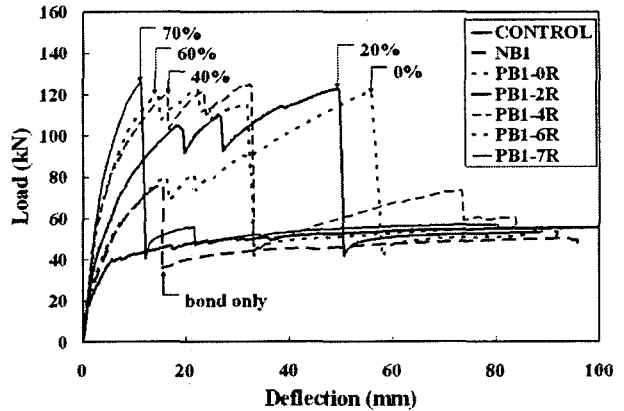


그림 4 보강 실험체의 하중-변위 곡선

5. 결론

- 탄소섬유판 재료강도의 약 60% 이하로 프리스트레스를 도입한 부착형 실험체에서는 탄소섬유판의 박리가 선행되며, 이후 비부착 상태로 전환되어 탄소섬유판의 파단으로 최종파괴에 도달한다.
- 탄소섬유판에 도입된 프리스트레스 양에 비례하여 보강된 부재의 균열하중, 항복하중 및 공칭하중은 증가하며, 최종파괴시의 부재의 처짐은 감소한다.
- 부착형 프리스트레스 시스템에서 탄소섬유판의 박리발생 이전에 파단을 유도할 수 있는 프리스트레스 양의 한계는 탄소섬유판 재료강도의 70% 이상인 것으로 판단된다.
- 탄소섬유판을 단순 부착하여 휨 보강된 실험체는 탄소섬유판 인장강도의 약 50%에서 박리파괴가 발생되어 충분한 보강성능이 발현되지 않는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- Camata, G., Spacone, E. and Saouma, V., 2003, "Debonding Failure of RC Structural Members Strengthened with FRP Lamimates" Proc., 6th Int. Symp. on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures(FRPRCS-6), pp. 267-276
- El-Hacha, R., Wight, R. G. and Green, M. F., 2004, "Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures" J. Compos. for Constr., ASCE, V. 8, No. 1, pp. 3-13.
- Seim, W., Horman, M., Karbhari, V. and Seible, F., 2001, "External FRP post-strengthening of scaled concrete slabs" J. Compos. for Constr., ASCE, V.5, No. 2, pp. 67-75
- 유영찬 외, 2005. 외부프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강공법 개발-2차년도연차보고서, 한국건설기술연구원
- Zou, X. W., 2003, "Flexural Behavior and Deformability of Fiber Reinforced Polymer Prestressed Concrete Beams" J. Compos. for Constr., ASCE, V. 7, No. 4, pp. 275-284.