

CFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 거동 특성

Behavior Characteristics of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate

박 중 열* 황 선 일* 조 흥 동** 한 상 훈***
Park, Jung-Yeol Hwang, Seon-II Cho, Hong-Dong Han, Sang-Hoon

Abstract

This paper presents the characteristics of flexural behavior of RC beam strengthened with CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate). Experimental variables included the strengthening length, width, reinforcement ratio, end anchorage and preloading corresponding to 75 percent of ultimate capacity and the effects according to each experimental variables were analyzed. To study, a total 21 RC beams were constructed, tested and the response of the beams in terms of ultimate load, deflection, strain of CFRP, failure mode were examined.

요 지

본 연구에서는 최근 구조물 보강을 위해 사용이 증가하고 있는 CFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동 특성을 분석하였다. 실험변수로 보강길이와 폭, 철근비, 단부정착 여부 그리고 무보강 기준실험체의 예상 극한하중의 75%에 상응하는 사전하중 여부를 고려하였으며, 각각의 실험변수에 따른 영향을 분석하였다. 이를 위해, 총 20개의 철근콘크리트 보를 제작하고 실험을 수행하였으며, 실험변수에 따른 극한하중, 처짐, CFRP의 변형률 그리고 파괴모드의 변화 특성에 대해 연구하였다.

Keywords : Concrete, CFRP, Flexural behavior

* 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사수료

** 정회원, 충북대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

*** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail : jung5623@orgio.net 016-9599-5623

•본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 역학적인 특성과 내구성이 우수한 CFRP와 같은 섬유보강 합성체가 노후화된 RC 구조물의 휨보강을 위해 많이 사용되고 있다. 이러한 보강을 통해 실험체의 휨강도 및 휨강성을 증대시킬 수 있으며, 초기균열하중 지연 및 균열폭 감소효과를 기대할 수 있다. 또한, 무보강 실험체가 몇 개의 휨균열이나 전단균열에 의해 파괴되는 것과는 달리 보강된 실험체에서는 전체적으로 균열수가 증가하는 균열분포 특성을 보이게 된다.

이러한 장점에도 불구하고 대부분이 예측시와 같은 접착제를 이용하여 표면 부착을 실시하므로 CFRP가 충분한 성능을 발휘하기 전에 부착면에서 CFRP의 박리로 인해 파괴되는 취성적인 파괴특성을 갖게 된다. 또한, 보강된 실험체의 거동특성은 보강길이, 콘크리트 강도, 철근비, 접착제 물성 등 여러 가지 변수들에 따라 차이를 보이게 된다.^{(1),(2)}

따라서, 본 연구에서는 CFRP로 휨보강된 RC 보의 실험변수에 따른 영향을 분석하기 위해, CFRP의 보강길이와 폭, 철근비 그리고 사전재하 및 단부정착 여

부를 실험변수로 하여 휨실험을 수행하였다. 실험을 통해 실험변수에 따른 휨성능 개선효과와 연성 특성 그리고 파괴모드 등의 변화에 대해서 비교·분석하였다.

2. 실험계획

2.1 실험체 제작

CFRP로 보강된 RC 보의 휨거동 특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 실험체를 21개 제작하였으며, CFRP를 RC 보의 하면에 표면 부착한 후 휨실험을 수행하였다. 이 때 보강된 실험체에서 휨파괴나 CFRP의 박리 파괴 발생전에 전단파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 전단철근을 10cm 간격으로 충분히 배근하였다. 실험체와 그에 따른 실험변수는 Table 1과 같다.

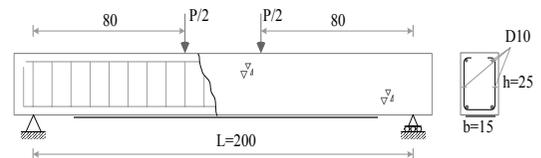


Fig. 1 Specimen geometry(unit : cm)

Table 1 Details of test beams

Group	Specimen	Strength of concrete (f_{ck} , kgf/cm ²)	CFRP plate		Reinforcing bar	Remark
			Length (Lp, cm)	Width (bp, cm)		
	BC	212	-	-	D13	Control beam
A	A_6N	212	120(0.6L)	10	D13	
	A_8N	212	160(0.8L)	10	D13	
	A_10N	212	200(1.0L)	10	D13	
	A_6U	212	120(0.6L)	10	D13	End anchorage
	A_8U	212	160(0.8L)	10	D13	End anchorage
	A_10U	212	200(1.0L)	10	D13	End anchorage
B	B_6N	212	120(0.6L)	10	D13	
	B_8N	212	160(0.8L)	10	D13	
	B_10N	212	200(1.0L)	10	D13	
	B_6U	212	120(0.6L)	10	D13	End anchorage
	B_8U	212	160(0.8L)	10	D13	End anchorage
	B_10U	212	200(1.0L)	10	D13	End anchorage
C	C_10	290	160(0.8L)	5	D10	
	C_13	290	160(0.8L)	5	D13	
	C_16	290	160(0.8L)	5	D16	
	C_19	290	160(0.8L)	5	D19	
D	D_10	290	160(0.8L)	10	D10	
	D_13	290	160(0.8L)	10	D13	
	D_16	290	160(0.8L)	10	D16	
	D_19	290	160(0.8L)	10	D19	

Group A, C, D : Non-preloading, Group B : Preloading

2.2 사용재료

본 실험을 위해 1종 보통포틀랜드 시멘트와 25mm 이하의 굵은 골재를 사용하여 실험체를 제작하였다. 콘크리트 강도는 $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 크기의 원주형 공시체를 제작하여 습윤 양생한 후 재령 28일에서 측정된 공시체의 압축강도를 기준으로 하였으며, 각 공시체에 대한 압축강도의 평균값을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 주철근은 KS D 3504의 이형 철근으로 Group A, B에서는 SD 30, Group C, D에서는 SD 40을 사용하였으며, 압축철근과 전단철근은 D10 철근을 사용하였다. 또한, 보강을 위해 CFRP는 스위스 S&P사에서 개발한 탄소판 컴퍼지트 200/2000 제품을 사용하였으며, 단부정착을 위해서는 H사에서 개발한 carbonex sheet(NR72)인 탄소섬유시트(carbon fiber sheet, CFS)를 사용하였다. 재료 특성치에 대한 자세한 내용은 Table 2와 같다.

2.3 실험방법

하중재하는 100tonf 용량의 유압식 만능시험기(UTM)를 사용하였으며, 하중 제어방식에 의해 4점 재하하였다. 또한, 최종 파괴시까지 실험체 중앙부에서의 처짐과 인장철근, 콘크리트 그리고 CFRP의 변형률을 측정하였다. 그리고 실험체의 초기균열과 균열진행상황 그리고 CFRP의 탈락 등을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 분석

CFRP로 휨 보강된 RC 보의 실험결과를 Table 3과 같다. Group A, B의 보강된 실험체는 기준 실험

체에 비해 하중저항능력이 각각 23.9%~82.3%와 16.2%~74.7%까지 증가하였다. 또한, 보강된 실험체가 기준 실험체에 비해 극한상태에서의 처짐이 크게 감소하여 휨강성이 개선됨을 알 수 있었다. Group A의 경우 기준 실험체에 비해 초기균열 하중이 증가하였으며, Group D가 Group C에 비해 부착폭이 커짐에 따라 초기균열 하중이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이때 육안관찰에 따른 착오를 막기 위해 하중-처짐곡선에서 초기 기울기 변화시점을 초기균열 발생시점으로 고려하였다. 또한 기준 실험체의 연성지수가 6.09인 반면 보강된 실험체의 연성지수는 1.42~2.56 범위로 나타나 기준 실험체에 비해 취성적인 파괴특성을 확인할 수 있었다.

기준 실험체의 파괴 형태는 인장철근의 항복 이후 콘크리트의 압축부하 파쇄되는 전형적인 휨파괴 모드를 보였지만 CFRP의 보강에 따라 계면박리파괴, 단부박리파괴 그리고 정착 보강부 파괴가 동반된 계면박리파괴가 관찰되었다. A_6N, B_6N 실험체의 경우 인장철근 항복 이전에 단부박리에 의한 파괴가 발생하여 철근 항복시의 하중, 처짐을 기록하지 못하였다.

3.1 보강길이의 영향

Fig. 2는 A_N 계열의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 기준 실험체와 비교하여 극한하중이 크게 증가하였으며, 전체적인 보의 거동은 유사하지만 보강길이가 증가함에 따라 실험체의 극한하중과 극한상태에서의 처짐이 증가하였다. A_6N 실험체의 경우 인장철근의 항복 이전에 CFRP가 조기 박리되고 인장철근이 하중을 부담하게 되면서 보강된 다른 실험체에 비해 극한상태 이후 긴 처짐구간을 나타내었다.

Table 2 Material properties

	Concrete	Reinforcing bar				CFRP	CFS		Epoxy
		D10	D13	D16	D19				
Modulus of elasticity(kgf/cm ²)	-	2×10^6				2×10^6	3×10^4	Tensile strength (kgf/cm ²)	269
Yield strength (kgf/cm ²)	-	4,370* (3,500)**	4,400 (3,600)	4,550 (-)	4,600 (-)	-	-	Compressive strength (kgf/cm ²)	839
Ultimate strength (kgf/cm ²)	212,290	5,960 (5,130)	6,000 (5,310)	6,100 (-)	6,170 (-)	23,000	39,650	Bonding strength (kgf/cm ²)	47
Ultimate strain(%)	-	-	-	-	-	1.11	-	-	-

* SD 40, ()** SD 30

Table 3 Results of test

Specimen	Initial crack load(tonf)	Yielding of steel		Ultimate state			Ductility index (μ^*)	Failure mode
		Load (tonf)	Deflection (δ_y , mm)	Load (tonf)	ratio of increase(%)	Deflection (δ_u , mm)		
BC	1.051	4.724	5.17	5.807	-	31.51	6.09	Flexural
A_6N	1.734	-	-	7.193	23.9	5.79	-	Ripping-off
A_8N	1.588	7.355	5.77	9.659	66.3	9.84	1.71	Interface debonding
A_10N	1.850	7.405	6.18	9.873	70.0	10.77	1.74	Interface debonding
A_6U	1.568	8.335	8.67	9.071	56.2	14.67	1.69	Interface debonding
A_8U	1.832	7.267	5.92	9.970	71.7	10.69	1.81	Interface debonding
A_10U	2.301	7.122	5.79	10.585	82.3	11.83	2.04	Interface debonding
B_6N	-	-	-	6.749	16.2	8.15	-	Ripping-off
B_8N	-	7.472	5.24	9.922	70.9	9.97	1.90	Interface debonding
B_10N	-	7.152	4.73	10.143	74.7	9.37	1.98	Interface debonding
B_6U	-	8.338	6.63	9.357	61.1	17.00	2.56	Interface debonding
B_8U	-	7.664	6.39	9.589	65.1	10.51	1.64	Interface debonding
B_10U	-	7.859	5.92	9.263	59.5	8.74	1.48	Interface debonding
C_10	1.124	5.896	6.86	7.006	-	9.75	1.42	Interface debonding
C_13	1.079	7.516	7.78	9.500	-	13.42	1.72	Interface debonding
C_16	1.225	9.457	6.72	11.933	-	13.24	1.97	Interface debonding
C_19	1.777	13.543	10.22	16.270	-	16.62	1.63	Interface debonding
D_10	1.426	8.321	8.14	11.557	-	14.88	1.83	Ripping-off
D_13	1.832	10.679	8.89	13.372	-	14.02	1.58	Ripping-off
D_16	1.373	10.799	7.90	15.301	-	16.44	2.08	Ripping-off
D_19	1.958	14.939	9.57	17.825	-	14.94	1.56	Ripping-off

* $\mu = \delta_u / \delta_y$: Calculated as the ratio of ultimate deflection to the deflection under the yielding load

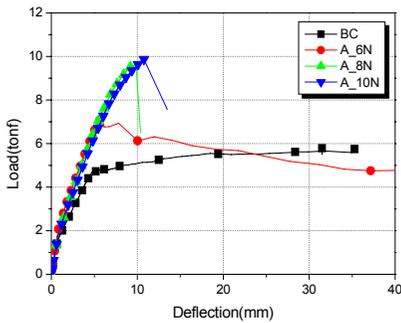


Fig. 2 Load-deflection curve(A_N series)

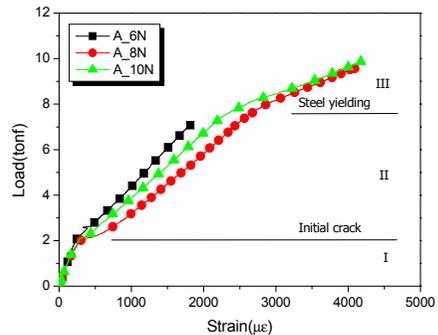


Fig. 3 Load-strain curve of CFRP(A_N series)

Fig. 3은 A_N 계열에 대한 CFRP의 하중-변형률 곡선으로서 일반적인 보강 실험체와 마찬가지로 크게 3구간으로 구분할 수 있다.⁽³⁾ CFRP의 변형률은 콘크리트의 초기균열 발생이전 구간(I)에서는 작은 변형률 분포를 보이지만 초기균열 발생 이후 인장철근의 항복 이전 구간(II)까지는 인장철근과 거의 비슷한 기울기로 변형

률이 증가하게 된다. 인장철근의 항복 이후의 구간(III)에서는 CFRP의 하중 부담이 증가하면서 변형률은 크게 증가하게 된다. 그러나, A_6N 실험체의 경우 인장철근의 항복이전에 CFRP가 파괴됨으로서 구간 III의 영역을 확인할 수 없었다. 0.8L 보강길이 이상에서 극한상태의 CFRP 변형률은 4,000 $\mu\epsilon$ 정도로 관찰되었다.

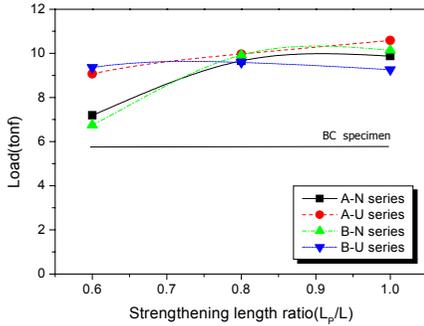
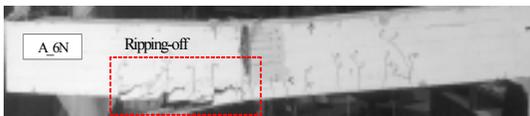


Fig. 4 Ultimate load according to length of CFRP



(a) A_6N



(b) A_10N

Fig. 5 Failure mode(A_N series)

Fig. 4는 보강길이의 증가에 따른 극한하중 변화를 나타낸 것으로서 보강 길이가 일정 수준 이상인 경우 극한하중은 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 보강길이가 증가함에 따라 보강효율은 감소함을 의미하며, 실험체의 순경간에 대한 보강길이의 비(L_p/L)가 0.8 이상부터 이러한 특성을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 보강길이 변화에 따른 파괴모드를 나타낸 것으로 보강길이가 상대적으로 작은 경우는 단부박리 파괴 양상을 보였으며, 보강길이가 길어짐에 따라 계면 박리 파괴를 보였다. 즉, 계열별로 보강길이가 상대적으로 작은 6N의 경우에서 단부박리 파괴가 발생되었다.

3.2 보강폭의 영향

Fig. 6은 보강폭 변화에 따른 하중-처짐곡선으로서

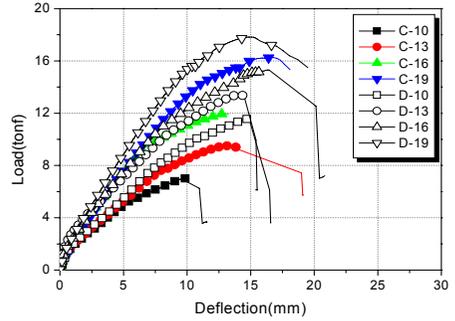


Fig. 6 Load-deflection curve



(a) C_10



(b) D_10

Fig. 7 Failure mode(C_10, D_10)

Group C는 Group D에 비해 부착면적이 상대적으로 작아 극한하중과 극한상태에서의 처짐이 작게 나타났다. Fig. 7은 보강폭 변화에 따른 파괴모드를 나타낸 것으로 보강폭이 작은 경우는 계면박리파괴(a)를 보였지만 보강폭이 증가함에 따라 부착면적 증대에 의해 계면박리파괴에서 단부박리파괴(b)로 파괴모드가 변화함을 알 수 있다.

3.3 철근비의 영향

Fig. 6에서 철근비가 증가함에 따라 휨강도와 휨강성이 뚜렷이 개선됨을 알 수 있다. 또한 Group C에서는 계면박리파괴, Group D에서는 단부박리파괴가 발생하였으며, D19 철근을 사용한 경우 콘크리트의 압축파괴가 동반되었다. 즉, CFRP와 인장 철근이 고려된 보강비가 어느 수준에 도달하게 되면 콘크리트의 압축파괴가 동반됨을 의미한다.

3.4 선하중 재하여부에 의한 영향⁽⁴⁾

보강이 요구되는 구조물의 경우 이미 균열이 발생된 상태가 대부분이므로 이러한 특성을 실험에서 반영하기 위해 보강전 선하중을 재하하였다. 이를 위해 무보강 실험체의 예상 파괴하중의 75%에 해당되는 하중을 재하하여 균열을 발생시켰으며, 선하중 재하여부에 따른 영향을 비교·분석하였다. Fig. 8은 이러한 선하중 재하유무에 따른 하중-처짐곡선으로서 재하여부에 상관없이 거동은 비슷하게 나타났다. 또한 파괴모드나 파괴시 CFRP의 변형률도 거의 동일하게 관찰되었다. 즉, 선하중 재하 여부가 CFRP로 보강된 보의 거동에는 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

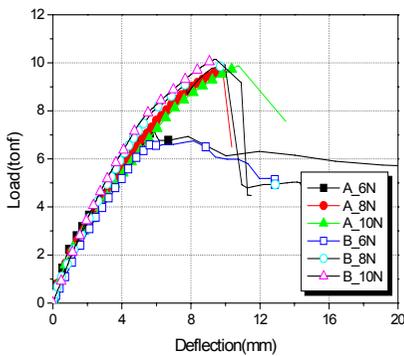


Fig. 8 Load-deflection curve(A_N and B_N series)

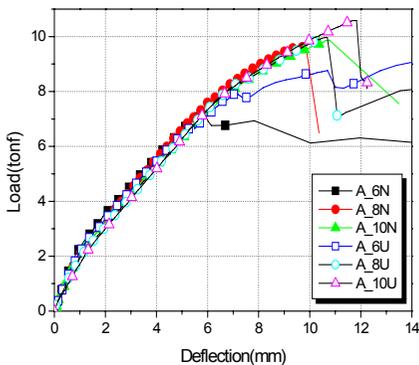


Fig. 9 Load-deflection curve(A_N and A_U series)

3.5 단부보강에 의한 영향⁽⁵⁾

CFRP로 보강된 RC 보의 파괴시 CFRP가 박리되어 파괴되는 취성적인 파괴특성이 문제시된다. 이는 CFRP 단부에서의 응력집중에 기인한 것으로서 좀더 연성적인 파괴를 유도하기 위해 CFRP 단부를 슈트로 감싸거나 앵커 볼트로 정착할 수 있다. 이러한 단부 정착 여부에 따른 거동 특성을 분석하기 위해 CFS로 CFRP의 단부를 감싼 후 휨실험을 수행하였다.

Fig. 9는 단부 정착 유무에 따른 하중-처짐 곡선을 나타낸 것으로 보강길이가 짧은 0.6L의 경우가 단부 정착에 의한 효과가 가장 크게 나타났으나, 보강길이가 길어짐에 따라 단부정착에 관계없이 극한하중이나 CFRP의 변형률은 거의 비슷하게 나타났다.

또한 대부분의 경우 CFRP 계면에서의 박리로 인한 파괴가 발생하였으며, 보강길이가 0.6L인 경우에는 단부 정착부 CFS의 박리와 함께 CFRP의 계면박리가 발생하였다.

4. 결론

CFRP로 휨 보강된 RC보의 휨실험을 수행하였으며, 실험변수에 따른 휨거동 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) CFRP의 보강을 통해 휨강도와 휨강성 증진효과를 확인할 수 있었으며, 무보강 실험체에 비해 초기균열 발생이 지연되는 효과를 얻을 수 있었다.
- 2) 보강길이가 증가함에 따라 파괴하중과 극한상태에서의 처짐이 증가함을 확인할 수 있었지만, 0.8L 이상에서는 파괴하중이 거의 일정한 값을 보였다. 또한, 보강길이가 증가함에 따라 단부박리 파괴에서 계면박리 파괴로 파괴모드가 변화하였다.
- 3) 보강폭이 증가함에 따라 부착면적 증가로 인해 파괴하중과 극한상태에서의 처짐이 증가하였으며, 계면박리에서 단부박리로 파괴모드가 변화함을 알 수 있었다.
- 4) 보강전 구조물에 대한 하중이력 특히, 선하중 여부는 휨거동에 큰 영향이 없음을 알 수 있었다. 또한, CFS를 이용한 단부 정착을 통해 하중저항능력이나

취성적인 파괴특성에는 큰 변화를 확인할 수 없었으며, 보강길이가 상대적으로 짧은 경우 단부 정착 효과가 크게 나타났다.

- 5) 철근비가 증가함에 따라 보강된 보의 휨성능은 증진되었으며, 계면박리 파괴 및 단부박리 파괴시 콘크리트의 압축 파쇄가 동반되었다.

참고문헌

1. 김규선, 심종성, "GFRP로 보강된 RC보의 계면박리파괴를 고려한 휨설계 기법", 한국구조물진단학회 학회지, 제4권 제2호, 2000, pp. 32~45.
2. 한상훈 외 4인, "탄소섬유 보강판을 이용한 RC보의 휨보강 효과에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001.
3. Meier, U. and Kaiser, H. P., "Strengthening of Structures with CFRP Laminates", Composites Material in Civil Engineering Structures, proceedings of the speciality conference ASCE, 1991, pp. 224~232.
4. Bonacci, J. F. and Maalej, M., "Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer for Rehabilitation of Corrosion Damaged Concrete Beams", ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 703~711.
5. Jones, R., Swamy, R. N. and Charif, A., "Plate separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", The Structural Engineering, Vol. 66, No. 5, 1988, pp. 85~94.

(접수일자 : 2002년 11월 8일)