

탄소섬유보강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨성능 개선에 관한 연구

The Study on Improvement of Flexural Performance of RC Beam Strengthened with CFRP Plate

한상훈* 최만용** 조홍동*** 박중열**** 황선일**** 김경식*****
Han, Sang Hoon Choi, Mhan Yong Cho, Hong Dong Park, Jung Yeol Hwang, Seon Il Kim, Kyoung Sik

ABSTRACT

This paper presents the results of research on improved flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with bonded carbon fiber reinforced polymer plate. Recently, strengthening technique with CFRP plate were almost carried out by external bonding. But current external bonding technique of CFRP plates may result in debonding CFRP plate. Therefore, this study proposes a strengthening method that prevents or delays debonding between CFRP plates and concrete and at the same time improves the strength. For this test, there were only 14 test beams manufactured and failure load, deflection, strains and modes of failure have been examined. Test variables included the type of strengthening, steel ratio and strengthening length, and the effects according to each test variables were analyzed. The experimental results show that the strength and stiffness of the beam significantly increased between 34.55 and 116.51% and the increase of the more load-carrying capacity than the control beams.

1. 서 론

최근 들어 콘크리트 구조물의 노후화로 인해 많은 문제점이 제기되고 있으며, 이를 해결하기 위해 강판, 탄소섬유쉬트(CFS), 탄소섬유보강판(CFRP)등을 이용한 많은 보강 공법들이 도입되고 있다. 그러나 이러한 공법들은 대부분이 표면부착에 의한 공법으로 국한되어 수행되고 있으며 이 경우 콘크리트와 모체 사이의 계면박리에 의한 취성적인 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유보강판의 표면부착시 문제가 되는 박리파괴(Debonding)를 지연시키거나 막기 위해 흡입에 의한 보강을 수행하였으며, 보강에 따른 휨성능을 비교·분석하였다.

* 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

** 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹 책임연구원

*** 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 연구원

**** 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

***** 충북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

2. 재료 및 실험계획

본 연구에서는 철근콘크리트속에 CFRP를 흡입하여 보강한 경우의 휨성능 개선효과를 분석하기 위해 다음과 같은 휨실험을 수행하였다. 무보강된 기준실험체, CFRP로 표면부착한 경우, CFRP를 세워 흡입한 경우 그리고 콘크리트의 피복두께를 제거한후 CFRP를 삽입한 경우의 총 14개의 실험체를 제작하였다. 또한 휨실험을 통해 얻어진 하중-처짐, 하중-변형률관계 그리고 파괴모드 등을 분석하였다.

실험체 제작을 위해 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재의 최대 치수는 19mm이하의 조골재를 사용하였다. 콘크리트는 목표강도에 따른 배합설계를 수행하여 타설하였으며, 실험체 제작시 별도로 $\phi 15 \times 30$ cm의 원주형 공시체를 제작한 후 재령 28일 후에 콘크리트 압축강도를 측정하였다. 이때 압축강도의 평균값은 271 kgf/cm^2 이었다. 또한 인장철근은 KS D3504 이형철근으로 SD 30A인 D13, D16, D19를 사용하였으며, 압축철근과 스테럽은 D10을 사용하였다.

CFRP는 Swiss S사에서 개발한 S&P Laminate(150/2000) 제품을 사용하였으며, 재료 특성치는 Table 1과 같다. 또한, 본 연구에서는 단면 보수를 위해 증보행용 단면 보수재인 젠크리트를 사용하였으며, 재료특성치로 부착강도는 19.8 kgf/cm^2 , 경사전단강도는 171 kgf/cm^2 이다.

Table 1. Material properties of CFRP

Properties of CFRP	Tensile strength kgf/cm^2	Modulus of elasticity kgf/cm^2
S&P Laminate (150/2000)	27,500 ~ 30,600	1,684,000

2.1 실험변수

기준실험체를 제외한 모든 실험체는 실제 구조물에서 발생 가능한 손상을 고려하기 위해 예상 파괴하중의 75%에 해당하는 사전하중을 재하 하여 초기 휨균열을 발생시킨 후 보강방법별로 보강을 수행하였다. 실험변수로는 보강형태, 철근비, 보강길이를 고려하였다.

3. 실험방법

본 연구의 수행을 위해 Fig. 1과 같이 순경간이 2m인 실험체를 제작하였으며, 전단보강을 위해 D10 철근을 10cm 간격으로 배근하였다. 또한 100tonf 용량의 UTM을 이용하여 하중제어방법에 의한 4점 재하를 수행하다. 각각의 보강 방법별 단면상세는 Fig. 2와 같으며 동일한 보강량을 갖도록 하였다.

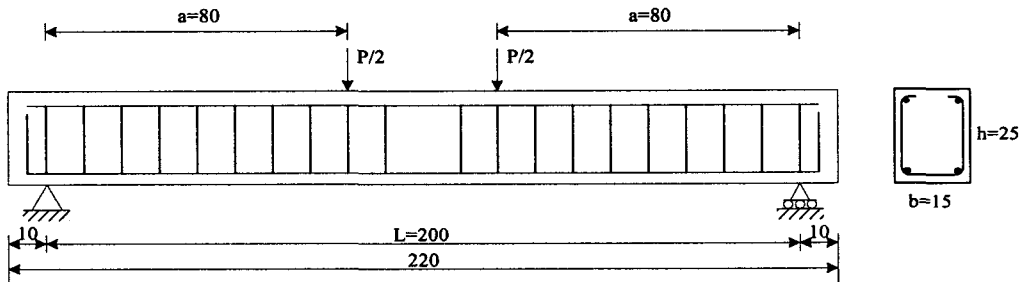


Fig. 1. Detail of test specimen(unit:cm)

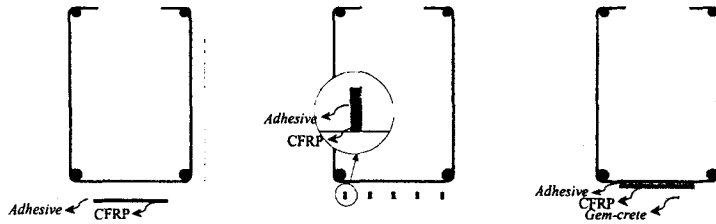


Fig. 2. Cross-section of plated beam

4. 실험결과 및 분석

각각의 실험변수별 파괴하중, 처짐 그리고 변형률 등의 비교를 통해 보강효과를 분석하였으며 보강 방법별 강성의 변화와 파괴양상의 차이를 비교하였다. 기준실험체 및 보강된 실험체에 대한 실험결과는 Table 2와 같다. 보강된 모든 실험체에서 하중 저항능력이 증가하였으며, 기준실험체와 비교한 결과 동일 하중하에서 처짐이 감소하여 강성이 증진되었음을 알 수 있다. 또한 휨실험 결과 세 가지 유형의 파괴모드 즉 휨파괴(flexural failure), 계면박리파괴(interface debonding failure), 단부박리파괴(ripping-off failure)가 나타났다.

Table 2. Results of beam test

Specimen	Yielding of rebar			Ultimate state			Ductility μ	Failure mode
	Load tonf	ratio of increase %	Deflection δ_y , mm	Load tonf	ratio of increase %	Deflection. δ_u ,mm		
CB13	4.09	-	5.19	5.27	-	64.33	12.39	Flexural failure
CB16	5.85	-	6.02	7.03	-	31.90	5.30	Flexural failure
CB19	8.15	-	6.89	9.35	-	19.48	2.83	Flexural failure
B13-A8	5.30	29.58	4.75	6.97	32.26	9.51	2.00	Interface debonding failure
B13-B8	6.07	48.41	5.29	11.41	116.51	24.20	4.57	Ripping-off failure
B13-C8	5.59	36.67	5.72	7.28	38.14	12.15	2.12	Flexural failure
B16-A8	7.40	26.50	5.52	9.48	34.85	12.35	2.24	Interface debonding failure
B16-B6	6.92	18.29	5.12	9.83	39.83	13.62	2.66	Ripping-off failure
B16-B8	7.32	25.13	5.52	12.11	72.26	22.53	4.08	Flexural failure
B16-B9	7.58	29.57	7.00	13.00	84.92	29.05	4.15	Flexural failure
B16-C8	7.15	22.22	6.02	10.96	55.90	19.75	3.28	Flexural failure
B19-A8	10.09	23.80	6.13	12.41	32.73	12.72	2.08	Interface debonding failure
B19-B8	10.26	25.89	6.83	13.39	43.21	19.01	2.78	Flexural failure
B19-C8	9.78	20.00	7.36	12.56	34.55	20.28	2.76	Flexural failure

* Calculated as the ratio of ultimate deflection to the deflection under the yielding load

B 16 - A 8

Strengthening length (6:0.6L, 8:0.8L, 9:0.9L)
 Strengthening type
 (A : Type A, B : Type B, C : Type C)
 Reinforcing bar (13:D13, 16:D16, 19:D19)
 Specimen for bending (B:Beam, CB:Control Beam)

4.1 하중-처짐 관계

Table 2에서 기준실험체에 대한 보강된 실험체의 하중 증가율은 항복시점에서 18.29%~48.41%, 극한상태에서 32.26%~116.51%의 증가율을 보여 휨강도가 증진되었음을 알 수 있다. 또한 보강된 실험체중 Type B의 하중 증가율이 가장 크게 증가하여 표면부착에 비해 흡입에 의한 보강효과가 우수함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 보강방법에 따른 하중-처짐곡선을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)~(c)에서 동일 하중에서의 처짐을 비교한 결과 기준실험체에 비해 CFRP로 보강한 실험체의 휨강성이 증진되었음을 알 수 있다.

항복시점과 극한상태에서의 처짐의 관계를 나타내는 연성지수를 비교한 결과, 보강된 실험체에서 2.0~4.57의 값을 얻을 수 있었으며, 기준실험체의 연성지수(2.83~12.39)에 비해 보강된 실험체의 연성지수가 작게 나타났다. 그러나 제안된 방법이 표면부착한 Type A에 비해 연성 특성이 개선됨을 보였으며, 특히 Type B의 경우가 다른 보강방법에 비해 연성지수가 크게 나타났다.

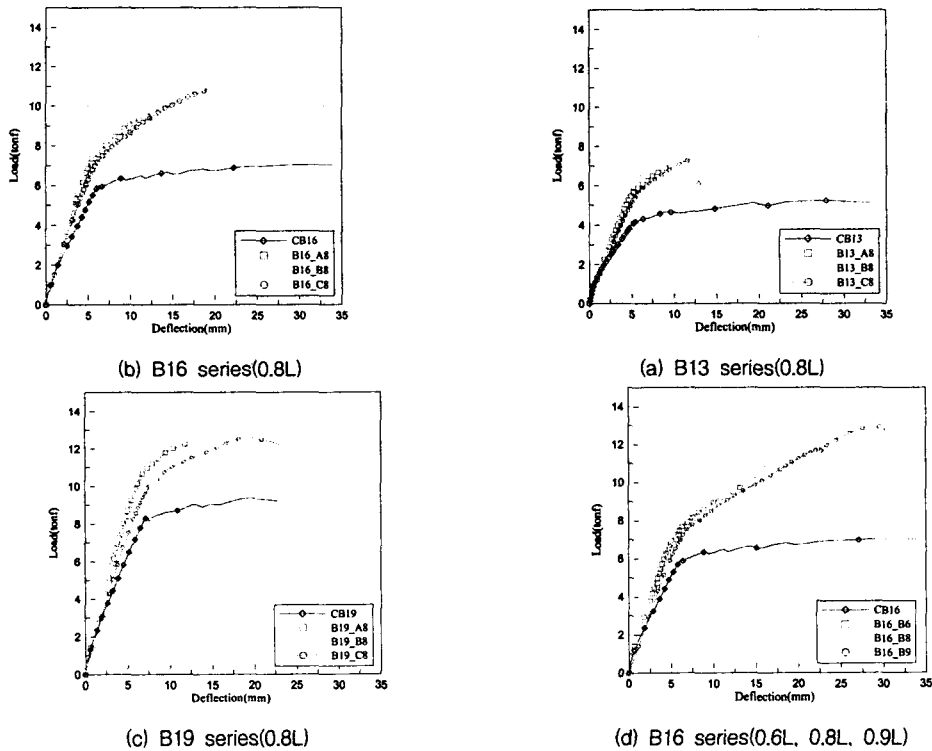


Fig. 3. Load-deflection curve according to strengthening type

4.2 하중-휨강성 관계

실험을 통해 얻어진 보의 경간 중앙에서의 하중 단계별 처짐을 통해 기준실험체와 보강된 실험체의 휨강성(EI) 변화를 확인하였다. Fig. 2와 같은 조건하에서 하중-처짐의 관계를 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 실험체의 휨강성 변화를 확인하였다. 단, 휨강성은 실험체의 전진길이에 걸쳐 일정하다고 가정하였다.

$$\delta = \frac{(3L^2 - 4a^2)}{48EI} Pa \quad (1)$$

철근의 항복시점에서의 휨강성을 비교한 결과 기준실험체의 휨강성은 120~190tonf·m²이며, CFRP로 보강된 실험체의 휨강성은 150~260tonf·m²로 나타나 보강에 의해 10~45%정도의 휨강성이 증진되었음을 알 수 있다.

4.3 인장철근과 CFRP의 변형률

대부분의 실험체에서 철근의 항복전까지는 인장철근과 CFRP의 하중-변형률 거동이 거의 유사하게 나타났지만, 철근의 항복과 함께 CFRP의 하중 부담률이 증가하면서 CFRP의 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다.

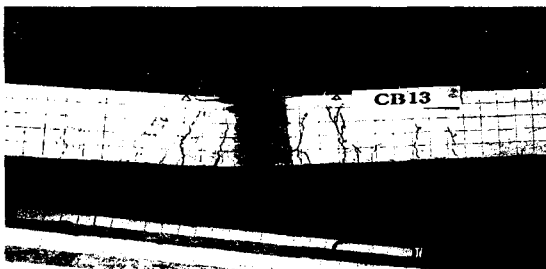
실험체의 파괴시 CFRP의 최대 변형률은 Type A로 보강된 경우는 3384~6279 $\mu\epsilon$, Type B의 경우는 6251~11084 $\mu\epsilon$ 그리고 Type C의 경우는 4270~7647 $\mu\epsilon$ 의 변형률 분포가 얻어졌다. 즉, Type B의 경우가 부착성능이 우수하여 다른 보강 방법에 비해 성능을 충분히 발휘하였다고 볼 수 있다.

4.4 파괴모드

CB13, CB16 그리고 CB19의 기준 실험체의 경우 인장철근의 항복후 압축부가 파쇄되는 전형적인 휨파괴 양상을 보였다. 보강후 실험체의 파괴 양상을 보강방법별로 보면, 콘크리트 인장부의 표면에 부착하는 Type A의 경우는 모두 계면박리파괴 양상을 보였다. 이는 CFRP의 부착면적이 작아 계면에서의 부착응력이 부착강도를 초과함으로써 발생된 것으로 판단된다.

표면에 홈을 낸 후 CFRP 세워서 삽입시키는 Type B의 경우는 단부박리파괴와 콘크리트의 압축파괴를 보였다. 철근비가 작은 경우 인장철근 아래의 콘크리트 피복두께를 CFRP가 묻고 떨어지는 단부박리파괴가 발생하였으나, 철근비가 증가하면서 콘크리트의 압축부가 파쇄되는 휨파괴 양상을 보였다.

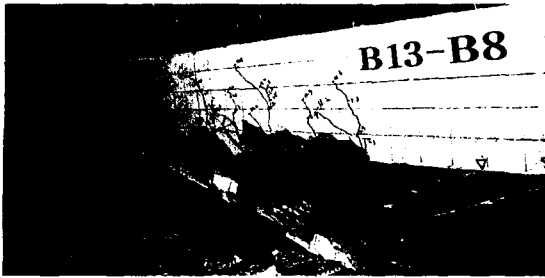
철근 피복두께를 제거한 후 CFRP를 삽입하여 보강한 Type C의 경우는 휨파괴양상을 보였다. D13, D16을 인장철근으로 사용한 경우 인장철근의 항복후 큰 인장균열이 발생하였으며 단면보수재가 콘크리트 모체로부터 분리되는 현상이 나타났다. D19 철근을 인장철근으로 사용한 경우에는 철근비의 증가로 인해 콘크리트 파쇄에 의한 압축파괴가 발생하였다.



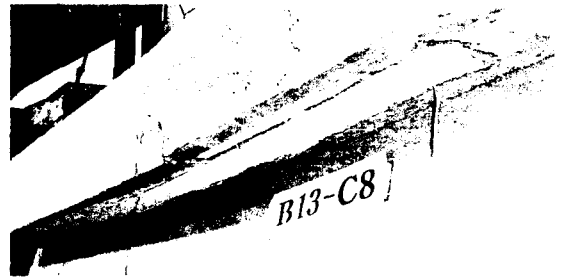
(a) Flexural Failure



(b) Interface Debonding Failure



(c) Ripping-off Failure



(d) Flexural Failure

Fig. 6. Failure Mode of Specimen

5. 결 론

본 연구에서는 표면부착공법의 취성적인 박리파괴와 연성거동 확보 문제를 해결하기 위해 콘크리트에 홈을 파고 CFRP로 삽입하여 보강하는 방법을 적용하였다. 이와 같이 CFRP의 보강형태를 달리하여 보강을 수행하였으며, 보강된 실험체에 대한 휨실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기준실험체에 비해 CFRP로 보강된 실험체의 파괴하중이 32.26~116.51%의 증가율을 보였다. 이중 콘크리트에 홈을 낸후 CFRP를 세워서 보강한 Type B의 경우가 보강효과가 가장 우수하였으며, 철근비가 작은 경우 하중증가율이 가장 크게 나타났다.
- 2) CFRP로 보강한 실험체의 연성은 기준실험체에 비해 작은 값을 보였지만 보강된 실험체의 경우 표면부착공법에 비해 본 연구에서 제안한 Type B의 방법이 연성특성을 상당히 개선됨을 확인하였다.
- 3) 실험체의 파괴시 CFRP의 변형률을 분석한 결과 제안된 보강 방법이 표면부착공법에 비해 파단시의 변형률이 크게 측정되었으며, 파괴모드를 분석한 결과 표면부착공법은 취성적인 박리파괴를 보였으나 보강형태를 달리함으로써 휨파괴와 단부박리파괴 양상으로 변화하였다. 이를 통해 CFRP와 콘크리트 사이의 합성거동이 표면부착공법에 비해 증진되었다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. Arduini, M., Tommaso, A. D., and Nanni, A., "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 4, pp. 363~370, July~Aug., 1997.
2. El-Mihilmy, M. T., and Tedesco, J. W., "Prediction of Anchorage Failure for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Plates", Vol. 98, No. 3, pp. 301~314, May~June, 2001.
3. 박명준, "탄소섬유보강판으로 보강한 철근콘크리트 보의 휨거동 특성", 충북대학교 토목공학과 석사 학위 논문, 2001, pp. 17~40.
4. 이영재, 문희중, 이경언, 정상진, 정란, "관판, 탄소섬유쉬트, 탄소섬유판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동", 한국콘크리트학회 논문집, 제9권 제2호, 1997, pp. 691~696.