

CFRP 보강공법에 따른 RC보의 휨성능 개선효과

Development of Flexural Capacity of RC Beam by CFRP Strengthening Methods

홍기남* 한상훈** 김형수*** 우상균**** 송영철***** 김형진*****
Hong, Ki Nam Han, Sang Hoon Kim, Hyung Soo Woo, Sang Kyun Song, Young chul Kim, Hyung Jin

ABSTRACT

Experimental research was conducted to investigate the characteristic of various CFRP strengthening methods. A total of 4 specimens of 3.3m length were tested in four point bending after strengthening them with externally bonded CFRP plates. The CFRP plates were bonded without prestress or with prestress levels of CFRP plate strain 0.5%. The non-prestressed specimen without anchor plate failed by separation of the plate from the beam due to premature debonding while the non-prestressed specimen with anchor plate failed by CFRP fracture and showed the significant increase of ductility capacity. In addition, the prestressed specimens failed by concrete compression failure. The maximum load and ductility capacity were most significantly increased.

1. 서론

성능이 저하된 철근콘크리트 구조물에 대한 성능 향상기술은 매우 다양하게 개발되어왔다. 과거에 많이 사용된 강판 보강공법은 부식 및 중량의 증가 등과 같은 문제로 인해 최근에는 적용 예가 많지 않으며, 대신 복합재료를 보강재로 이용하는 사례가 급증하고 있다. 특히, 접착제를 사용하여 탄소섬유 쉬트를 콘크리트에 부착하는 보강방법이 주목받고 있다. 이 같은 부착방식 보강기술은 콘크리트와 보강재 사이의 계면거동이 보강효과에 큰 영향을 미치고 계면에서의 파괴가 구조물의 휨성능을 좌우하는 예가 많은 것으로 보고 되고 있으며, 특히 단부에서의 응력집중은 이러한 계면파괴를 유발하는 중요한 인자로 인식되어 왔다.

따라서, 본 연구에서는 접착제를 이용한 기존 보강공법의 문제점을 파악하고 이를 개선하기 위한 방안으로 보강방법을 달리한 RC보에 대한 휨 실험을 실시하였다. 본 연구에서 고려한 보강방법은 표면 부착공법, 단부정착공법, 프리스트레싱 공법 등이며, 실험을 통해서 각 공법의 특성 및 성능개선 효과 등을 분석하였다.

2. 실험개요

본 실험은 탄소섬유(이하, CFRP)판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 보강방법에 따른 보강효과를 평가하기 위해서 수행되었다. 실험변수로는 표면부착, 단부정착, 그리고 프리스트레싱 보강공법 등을 고려하였다.

*정회원, 충북대학 토목공학과 연구원

**정회원, 충북대학 토목공학과 교수

***정회원, 충북대학 대학원 석사과정

****정회원, 한국전력연구원 선임연구원

*****정회원, 한국전력연구원 수석연구원

*****정회원, 주성대학 토목과 교수

2.1 실험체 제원

본 실험에서는 슬래브를 모형화한 총 4개의 철근콘크리트 실험체를 제작하였다. 그림 1에 실험체의 형상 및 배근개요를 나타내었으며, 표 1에는 실험체 제원을 나타내었다. 그림 1에 나타난 것과 같이 모든 실험체의 단면은 400mm×220mm이고, 길이가 3300mm이다. 또한, 모든 실험체에는 휨과피 이전에 전단파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 양 지점부로부터 1050mm 구간에 150mm 간격으로 전단철근을 배근하였다. 실험체의 지점으로부터 단부까지의 거리는 150mm이며, 전단철근의 하면에 30mm 스페이서를 설치하여 모든 공시체가 동일하게 30mm의 피복두께를 확보할 수 있도록 하였으며, 인장철근은 D16 철근을 3개씩 배근하였다. CFRP판의 보강길이는 모든 실험체에서 동일하게 순경간의 80%인 2400mm로 하였다.

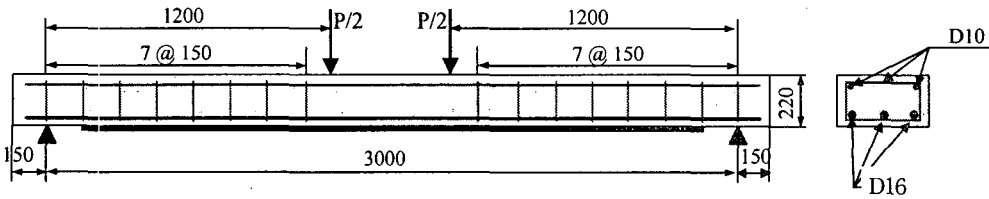


그림 3. 실험체 제원

표 2. 실험체 제원

실험체명	인장철근비 (%)	보강폭 (mm)	보강길이 (mm)	보강방법
MU-III	0.86	-	-	Control
MS-III	0.86	50	2400	표면부착
ME-III	0.86	50	2400	단부정착
M5-III	0.86	50	2400	프리스트레싱

2.2 사용재료

본 실험에서 사용된 콘크리트 설계강도는 28MPa, 슬럼프는 12.0±2.5cm로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 실험체에 사용된 철근은 설계항복응력 400MPa인 D16 철근을 사용하였고, CFRP판은 폭 50mm, 두께 1.4mm를 사용하였다. 실험에 사용된 콘크리트와 CFRP판의 물리적 특성을 각각 표 2와 표 3에 나타내었다.

표 2. 콘크리트의 물성치

압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
19.2	2.0	2.07×10 ⁵

표 3. CFRP판의 물성치

두께 (mm)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	극한변형률 (%)
1.4	2,700	1.65×10 ⁶	1.2

2.3 재하방법 및 측정항목

1000kN 용량의 유압장치를 이용하여 정적하중을 변위제어 방식으로 4점재하 하였다. 하중재하에 따라 실험체 중앙에 설치한 2개의 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였으며, 각 인장철근의 중앙위치에 부착한 3개의 변형률게이지로부터 인장철근의 변형률을 측정하였다. 또한, CFRP판에도 10개의 변형률 게이지를 부착하여 각 하중단계에서의 CFRP판 변형률을 측정하였다. 그리고 실험체의 초기균열과 균열진행상황, CFRP판의 탈락 및 파단 등을 육안으로 관찰하여 기록하였으며, 각 하중단계에서 발생하는 균열을 부재면에 기록하였다.

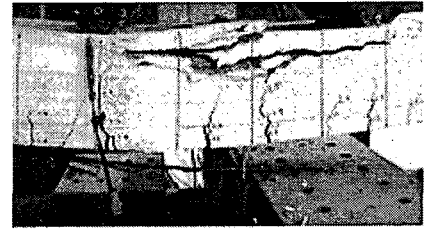
3. 실험결과

3.1 파괴양상

기준실험체인 MU-III는 초기균열이 11.5kN에 발생하였으며, 하중이 증가하면서 실험체 인장부에 휨균열이 일정한 간격으로 발생하기 시작했다. 최대하중 이후 새로운 휨균열은 발생하지 않고 실험체 중앙부 근처의 균열이 압축부로 성장하면서 균열 폭이 증가하여 처짐이 크게 증가하였다. 최종파괴 시점에서는 인장부에 발생한 균열이 성장하여 압축부까지 도달하였으며, 이로 인해 압축부 콘크리트가 압괴하는 전형적인 휨파괴 양상을 나타내었다. CFRP판을 표면부착한 MS-III 실험체는 초기균열 발생하중이 22.1kN으로 기준실험체보다 100%정도 증가하였다. 또한, 그 이후 발생하는 휨균열은 MU-III와는 다르게 일정한 간격과 속도로 압축부로 진전하는 거동을 나타내었다. 최대하중에서는 MU-III와 동일하게 새로운 휨균열은 발생하지 않았으며, 이미 발생한 균열의 폭도 크게 증가하지는 않았다. 최대하중에서 급작스럽게 CFRP판의 단부에서 큰 소음이 발생하면서 CFRP판이 탈락하는 취성적인 파괴모드를 나타내었다. CFRP판을 단부정착하여 부착한 ME-III 실험체는 초기균열 발생하중이 23.3kN으로 MS-III 실험체와 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 MS-III 실험체와는 다르게 중앙부에서 탄소판이 탈락한 이후에도 계속적으로 하중을 유지하면서 변위가 매우 크게 증가하다가 중앙부 CFRP판의 인장파단으로 파괴되었다. 프리스트레싱 보강한 M5-III 실험체의 경우 다른 실험체들과 비교해서 초기균열 발생하중이 크게 증가하였으며, 균열이 지점부까지 균일한 간격으로 발생하였다. 철근의 변형률이 항복변형률 이상으로 증가하면서 CFRP판과 콘크리트의 부착면에서 약간의 파괴음이 발생하기 시작했다. 재하하중이 최대하중에 도달하면서 실험체의 중앙부에서 CFRP판과 콘크리트를 일체화시키고 있던 에폭시가 콘크리트로부터 떨어지면서 엄청난 폭음이 발생하였다. 그 이후에도 최대하중을 안정적으로 유지하면서 변위가 증가하다가 중앙부 압축단 콘크리트의 압괴로 파괴되는 전형적인 압축파괴 형상을 나타내었다.



(a) MS-III



(b) ME-III



(c) M5-III

그림 2. 파괴양상 비교

3.2 보강성능

표 4에 모든 실험체의 실험결과를 나타내었다. 표 4를 통해서 알 수 있듯이 표면부착 보강한 MS-III와 ME-III 실험체의 최대하중은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 5000 μ 의 프리스트레싱을 도입한 M5-III 실험체는 기준실험체 MU-III 실험체에 비해 최대하중이 약 67% 증가하여 보강성능이 다른 보강공법에 비해 탁월한 것으로 나타났다.

표 4. 실험결과

실험체	초기균열 (kN)	철근항복 시		최대하중 시		파괴모드
		하중 (kN)	처짐 (mm)	하중 (kN)	처짐 (mm)	
MU-III	11.5	57.5	18.3	71.0	69.7	휨파괴
MS-III	22.1	84.8	20.6	88.1	23.4	표면박리
ME-III	23.3	87.3	26.4	94.9	49.6	인장파괴
M5-III	36.3	100.1	21.9	118.4	42.7	압축파괴

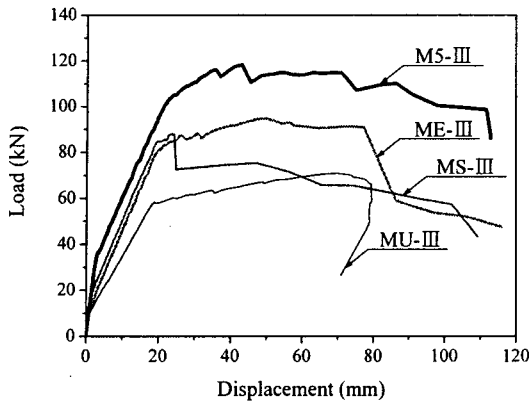


그림 3. 하중-변위 관계

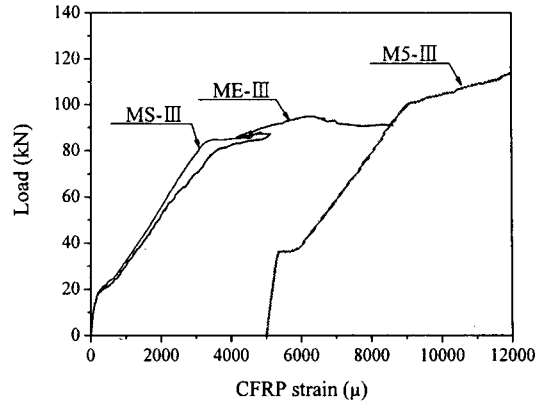


그림 4. 하중-CFRP판 변형률 관계

그림 3에는 실험으로부터 얻은 각 실험체의 하중-변위 관계를 나타내었다. 그림 3은 각 보강공법의 특징을 잘 나타내고 있다. CFRP판을 표면부착 시공한 MS-III의 경우 최대하중 이후 CFRP판의 박락으로 내력을 급격하게 상실하는 거동을 보이고 있으며, 파괴시 CFRP판의 변형률이 한계변형률의 약 50% 정도임을 그림 4로부터 알 수 있다. 한편 CFRP판을 단부에 정착하여 표면부착한 ME-III 경우 중앙부 CFRP판이 탈락한 이후에도 계속적으로 하중을 유지하고 있으며 연성이 MS-III 실험체에 비해 크게 증가하는 거동을 보이고 있다. 또한, 그림 4의 하중-CFRP판 변형률 관계로부터 CFRP판의 효율성이 크게 향상됨을 확인할 수 있다. CFRP판에 프리스트레스를 도입하여 부착한 M5-III 실험체는 그림 3에서 나타낸 바와 같이 가장 보강효과가 우수하고 연성능력이 탁월한 것으로 나타났으며, CFRP판의 재료성능을 거의 100%까지 효과적으로 이용할 수 있는 보강공법이라는 것을 그림 4로부터 확인할 수 있다.

4. 결론

- 1) CFRP판을 표면부착하는 경우 CFRP판 재료성능의 50%정도 수준에서 부착파괴로 인한 조기파괴 거동을 확인하였다.
- 2) CFRP판을 단부정착하여 표면부착하는 경우 보강성능에는 큰 효과가 없었으나, 연성능력이 크게 증가하며 CFRP판 효율성이 크게 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) CFRP판에 프리스트레스를 도입하여 부착하는 경우 보강성능 및 연성능력이 타 공법에 비해 탁월하게 증가하며 CFRP판의 재료성능을 십분 활용할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Garden, H. N., and Hollaway, L. C.(1998) An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates, Composites Part B, Vol. 29, pp. 411~424.
2. Quantrill, R. J., and Hollaway, L. C.(1998) The Flexural Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams by the Use of Prestressed Advanced Composite Plates, Composites Science and Technology, Vol. 58, pp.1259~12.
3. 김형수, 홍기남, 이상균, 송영철, 한상훈(2005) 프리스트레스를 가한 CFRP판으로 보강한 철근콘크리트 보의 휨성능 개선, 한국콘크리트학회 봄학술발표대회논문집, 제 17권, 1호, pp.471~474.