

CFRP판을 단부정착한 RC보의 휨성능 개선에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Flexural Performance Evaluation of
RC Beams Strengthened with Anchored CFRP Plates

김형진* 홍기남** 한상훈***
Kim, Hyung-Jin Hong, Ki-Nam Han, Sang-Hoon

Abstract

The purpose of this paper is to analyse and compare experimentally flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP plates by different methods, which are divided into three classes: externally-bonded without end anchorage, externally-bonded with end anchorages, and anchored after prestressing of CFRP plates. Test results show that the RC beams strengthened with end anchorages have the improvement of ductility and flexural performance evaluation including ultimate strength and deflection, compared with only external bonding. Especially, RC beams with prestressed and anchored CFRP plates increase ultimate strength and ductility significantly.

요 지

본 논문의 목적은 CFRP판을 여러 가지 방법으로 보강한 RC보의 휨 거동을 실험적으로 비교, 분석하는 것이다. 휨 보강방법은 표면부착만 한 경우, CFRP판을 부착 후 단부정착한 경우 및 프리스트레스를 가한 후 단부정착한 경우의 3가지로 대별하였다. 실험결과는 단부정착한 RC보가 표면부착만 한 경우와 비교하여 연성이 증대되고 극한하중과 처짐 등의 휨성능이 개선되어 단부정착 방법이 효율적임을 보여주었으며, 특히 CFRP판에 프리스트레스를 가한 후 단부정착한 경우가 극한하중 및 연성이 현저히 증가함을 보였다.

Keywords : CFRP plate, Bond, End Anchorage, Ductility, Flexural Performance, Prestress

핵심 용어 : 탄소섬유보강판, 부착, 단부정착, 연성, 휨성능, 프리스트레스

* 정회원, 주성대학 토목과 교수

** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

E-mail : kimhjin@jsc.ac.kr 043-211-8008

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

RC 및 PSC 구조물의 성능 저하와 노후화는 유지보수 비용의 증가와 더불어 사회문제로까지 대두되고 있다. 성능이 저하된 구조물의 사용성과 안전성을 향상시키기 위하여 높은 인장강도와 고탄성, 내부식성을 갖는 탄소섬유보강판(carbon fiber reinforced polymer plate, 이하 CFRP판)을 외부부착하여 구조물의 강도와 강성을 증가시키는 방법이 최근 널리 시행되고 있다.

하지만, 각종의 복합재료를 이용한 기존의 보강방법은 주로 표면부착을 통하여 실시되므로 보강재 단부에서의 응력집중과 통기성, 수분접촉 등의 환경적 요인에 의해 부식 및 박리(부착면 파괴)가 발생하여 보강재의 재료적 성능이 충분히 발휘되기도 전에 조기파괴되는 문제점을 안고 있다. 이에 CFRP 재료를 콘크리트 부재에 홈을 내어 삽입하거나 표면매립 등의 방법으로 조기파괴를 방지하는 공법이 최근 시행되고 있으나 경제성과 효과성에서 여전히 문제가 있다고 알려져 있다. 또한 기존의 연구는 부착거동의 해석을 통한 조기파괴강도의 계산과 메카니즘^{[1]-[3]} 유효부착길이의 결정^[4] 등과 같은 계면파괴 인자에 관한 연구가 주류를 이루고 있으며 적극적으로 조기파괴를 방지하는 기술을 찾는 연구는 부족한 실정이다. 따라서 CFRP판을 단부정착하거나 프리스트레스를 가하여 정착하는 기술을 개발함으로써 CFRP판의 박리에 의한 조기파괴를 방지하고 보강 부재의 휨성능을 획기적으로 개선할 필요성이 있다.^{[5]-[8]}

본 연구에서는 CFRP판을 단순히 단부정착한 경우와 프리스트레스를 가한 다음 단부정착한 경우의 보강구조의 성능을 단부정착 없이 표면부착한 경우와 비교하여 연성 증대 및 휨성능 개선효과를 실험적으로 분석함으로써 경제적이고 효율적인 단부정착장치의 개발과 더불어 단부정착의 규모 및 보강량의 결정 등 단부정착시스템을 적용한 보강구조 설계법의 기초자료로 삼고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

2.1.1 콘크리트

보강 구조의 콘크리트 강도에 따른 영향을 관찰하기 위해 콘크리트 강도를 3가지로 달리하여 실험변수로 하였다. 이를 위해 1종 포틀랜드시멘트와 25mm 이하의 굵은골재를 사용한 레미콘을 이용하여 실험체를 제작하였으며, 설계강도는 각각 21MPa, 28MPa, 36MPa를 목표로 하였고 슬럼프는 12.0±2.5cm로 설정하였다. 콘크리트 강도는 $\phi 100 \times 200$ mm 크기의 원주형 공시체를 제작하여 수중양생한 후 재령 28일에서 압축강도를 측정하였으며, 각 실험체의 압축강도의 평균값은 21.8MPa, 27.0MPa, 33.0MPa로 나타났다.

2.1.2 CFRP판 및 에폭시

실험에 사용된 CFRP판은 스위스 S사에서 개발된 제품으로서 두께는 1.4mm이며 철근과 비교하여 탄성계수는 거의 같으나 인장강도는 약 5배인 재료이며, CFRP판의 부착에 사용된 에폭시는 같은 회사에서 생산하는 제품으로서 재료 특성값은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 CFRP판의 재료 특성치

제 품 명	탄성계수 (MPa)	극한강도 (MPa)	극한변형률 (%)
S&P Laminate (150/2000)	165,000	2,700~3,000	1.2

Table 2 에폭시의 재료

제 품 명	압축강도 (MPa)	휨강도 (MPa)	부착강도 (MPa)	경도
Epoxy resin200	80.3	42.2	3.0	84

2.1.3 철근

인장철근은 KS D 3504의 이형철근으로 SD 400을 사용하였다. 또한, 압축철근과 전단철근은 D10 철근을 사용하였으며, 그 재료 특성값은 Table 3과 같다.

Table 3 철근의 재료특성치

철근치수	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	신장률(%)
D10mm*	2 × 10 ⁵	626.2	500.7	17.8
D13mm*		622.2	498.7	20.0
D16mm*		732.1	476.2	16.3
D19mm*		683.1	465.8	16.4

* KS D3504 SD400, INI Steel Company

2.2 실험 변수

휨 실험에서 고려된 실험체와 실험변수는 Table 4와 같으며, 실험변수로는 콘크리트 강도, CFRP판의 보강방법, 그리고 철근비를 고려하였다. 정착방법은 단순히 단부정착만 한 경우와 프리스트레스를 가한 후 단부정착한 경우로 하여 각각의 전용 정착장치를 개발 적용하였다.

Table 4 실험 변수

실험체명	콘크리트 강도* (MPa)	보강방법	인장철근비 (%)
MU-III	28.0 (27.0)	무보강	0.86
MS-III	28.0 (27.0)	표면부착	0.86
LE-II	21.0 (21.8)	단부정착	0.55
LE-III	21.0 (21.8)	단부정착	0.86
ME-I	28.0 (27.0)	단부정착	0.30
ME-II	28.0 (27.0)	단부정착	0.55
ME-III	28.0 (27.0)	단부정착	0.86
ME-IV	28.0 (27.0)	단부정착	1.26
HE-II	36.0 (33.0)	단부정착	0.55
HE-III	36.0 (33.0)	단부정착	0.86
M5-III	28.0 (27.0)	인장후 정착(0.5%)**	0.86
M7-III	28.0 (27.0)	인장후 정착(0.7%)**	0.86

주) * : 목표 강도(실제 강도),

** : 프리스트레싱 레벨

I E(5) - II

① ② ③

① : 콘크리트강도, f_{ck}

(L=21.8MPa, M=27.0MPa, H=33.0MPa)

② : (문자) 정착방법

(U=무보강, S=표면부착, E=단부정착)

(숫자) 프리스트레싱 레벨(5=0.5%, 7=0.7%)

③ : 인장철근비

(I=0.30%, II=0.55%, III=0.86%, IV=1.26%)

2.3 실험 방법

2.3.1 실험체 제원

CFRP판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 휨성능 개선효과를 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 실험체를 제작하였다. CFRP판에 의한 보강길이는 순경간의 80%인 2400mm이며 폭은 50mm로서 단부정착을 위한 기구는 Fig. 2와 같다. 이때 보강된 실험체에서 휨파괴나 CFRP판의 박리파괴가 발생하기 전에 전단 파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 전단철근을 150mm 간격으로 배근하였다.

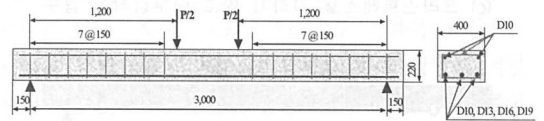


Fig. 1 실험체 상세(단위:mm)

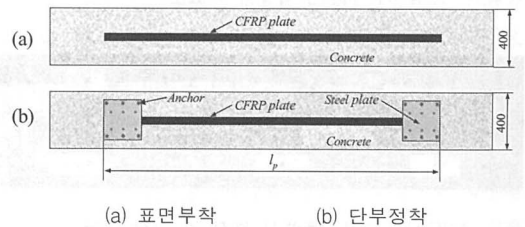


Fig. 2 보강 기구의 상세(단위:mm)

2.3.2 보강 방법

Fig. 3과 같이 철근콘크리트 보를 대상으로 무보강한 경우를 기준으로 하여 CFRP판을 표면부착만 한 경우, 프리스트레스를 가하지 않고 단부정착(단순 정착용 소형 정착장치)만 한 경우, 그리고 프리스트레싱 후 정착(인장전용 대형 정착장치)한 경우로 크게 4분류로 대별하여 실험체의 거동특성을 비교·분석하였다. 실험체에 대한 재하는 4점 재하방법을 선택하였으며 실험을 통하여 무보강 기준실험체와 각종 방법으로 보강한 실험체의 극한하중, 극한상태에서의 처짐, 철근 및 보강재의 변형률, 파괴모드 등의 자료를 얻었다. 더불어 고안된 정착장치와 CFRP판의 프리스트레싱 보강방법의 효율성 및 적용성 등을 분석하였다.

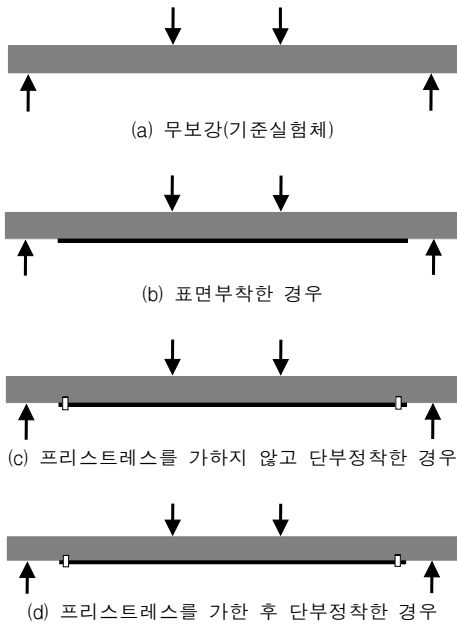


Fig. 3 휨실험 개요도

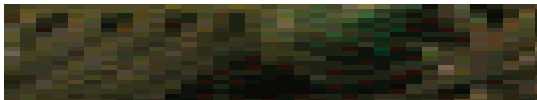


Fig. 4 프리스트레싱 보강 및 정착 장면



Fig. 5 단부정착장치

CFRP판을 정착한 후 프리스트레스를 가하기 위하여 고안된 장치는 Fig. 4와 같으며 프리스트레스를 가할 수 있는 특수 유압재과 인장후 정착이 가능한 정착판을 개발하였다. 프리스트레스를 가하지 않고 단순히 단부정착만 하는 장치는 Fig. 5와 같다.

2.3.3 재하 및 측정방법

하중재하는 Fig. 6과 같이 500kN용량의 유압재과 로드셀을 이용하여 4점 재하방식으로 하였다. 보의 중앙부의 인장철근에 3개, CFRP판에 5개의 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였고, 처짐 측정을 위하여 변위계(linear variable displacement transducer, LVDT)를 2개 설치하여 그 평균값을 변위로 취하였다. 모든 데이터는 데이터 로거(data logger)를 이용하여 실험체가 최종 파괴될 때까지 실험체 중앙부에서의 처짐과 철근, 콘크리트 및 CFRP판의 변형률을 하중단계별로 측정하였다. 더불어 실험체의 초기균열과 균열 진행상황, CFRP판의 탈락 등을 육안으로 관찰하여 기록하였으며, 각 하중단계에서 발생하는 균열을 부재면에 기록하여 실험 종료 후 균열도를 작성하고 사진촬영을 하였다.



Fig. 6 휨실험 전경

3. 실험 결과

무보강 기준실험체 및 CFRP판으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨실험 결과는 Table 5와 같다.

기준실험체는 콘크리트 강도와 철근비는 같으나 CFRP판으로 보강되지 않은 순수 RC구조의 실험체를 의미하며 MU-III에서 보듯이 휨강도 계산식에 의하여 충분한 정확도로 예측할 수 있으므로 다른 Type은 실험을 생략하고 계산값(예상 파괴하중)을 적용하였다.

기준실험체(MU-III)의 파괴형태는 인장철근 항복이후 콘크리트의 압축부가 압괴되는 전형적인 휨파괴 형태를 보였지만, CFRP판을 표면부착만으로 보강한 경우는 최대하중 이후 휨균열에 기인하여 하중저항능력은 점진적으로 감소하며 궁극적으로는 CFRP판이 급

Table 5 휨실험 결과

실험체	초기 균열 하중 (kN)	기준 실험체에 상 파괴 하중 (kN)	철근 항복시		최대 하중시			파괴 모드
			하중 (kN)	처짐 (mm)	하중 (kN)	처짐 (mm)	증가율 (%)	
MU-III	11.1	74.3	60.0	18.3	74.1	69.7	-	휨 파괴
MS-III	14.0	74.3	88.0	20.2	88.0	23.4	18.4	계면 박리
LE-II	10.0	50.9	61.6	21.3	66.3	38.4	30.3	FRP 파단
LE-III	12.0	72.5	84.6	26.0	84.6	26.0	16.7	FRP 파단
ME-I	18.0	30.3	49.3	19.9	74.1	81.4	1446	FRP 파단
ME-II	22.0	51.7	61.4	18.0	83.3	109.2	61.1	FRP 파단
ME-III	24.0	74.3	79.9	19.4	94.9	49.3	27.7	FRP 파단
ME-IV	18.0	99.5	118.9	27.9	123.4	37.9	24.0	FRP 파단
HE-II	21.0	52.4	61.4	18.6	84.2	37.9	60.7	FRP 파단
HE-III	25.0	75.6	80.8	18.7	102.7	52.2	35.8	FRP 파단
M5-III	37.0	74.3	104.8	23.9	118.3	42.9	59.2	FRP 파단
M7-III	43.0	74.3	109.6	25.2	119.5	33.9	60.8	FRP 파단

작스럽게 탈락하는 계면박리가 발생되어 보가 파괴되었다. 한편, CFRP판을 단부정착한 경우는 중앙부의 CFRP판이 부분적으로 박리된 이후에도 하중과 처짐이 계속 증가하다가 단부정착장치 근처의 CFRP판의 섬유가 점진적으로 갈라지다가 최종적으로는 CFRP판이 인장파단되며 보가 파괴되었으며, CFRP판을 프리스트레싱하여 보강한 경우는 초기 균열하중이 타 실험체에 비하여 매우 크게 나타났으며 철근의 항복 후에도 상당한 연성을 발휘하며 처짐이 증가하다가 CFRP

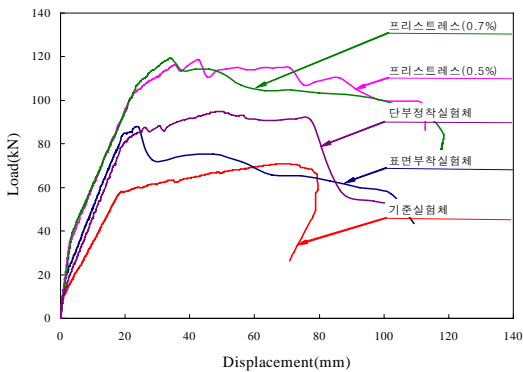


Fig. 7 보강방법별 하중-처짐 곡선

판이 폭음과 더불어 파단되며 보가 파괴되는 양상을 보였다.

3.1 보강 방법의 영향

Fig. 7은 콘크리트 강도(M)와 철근비(II)가 동일한 실험체에서 보강방법을 달리한 경우의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 단순히 표면부착만으로 보강한 경우에는 최대하중은 18.4% 증가하나 단부정착을 실시하면 27.7%가 증가한다. 그리고 CFRP판에 프리스트레스를 가하여 정착한 경우에는 0.5% 및 0.7% 프리스트레스 레벨에 대하여 각각 59.2%, 60.8%가 증가함으로서 보강공법이 매우 효율화됨을 알 수 있다. 특히, 프리스트레스를 가하여 보강하는 방법은 초기 균열이 기준실험체에 비하여 상당히 지연되며 Fig. 7의 하중-처짐 곡선에서 보듯이 최대하중의 증가는 물론 높은 하중에서의 연성 능력 또한 기타 실험체에 비하여 현저히 유리해 짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 보강방법별 CFRP판의 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 표면부착만으로 보강을 할 경우 FRP판의 변형률이 약 0.48%에서 계면박리 파괴가 발생함으로서 CFRP판 강도의 1/2 수준도 성능을 발휘하지 못하는 것으로 나타났다. 하지만, 프리스트레스를 가하지 않고 단부정착한 경우에는 0.87%, 프리스트레스를 가한 후 단부정착한 2종류의 실험체 경우에는 최대변형률이 공히 CFRP의 극한 변형률인 1.2%를 상회하는 것으로 나타났다.

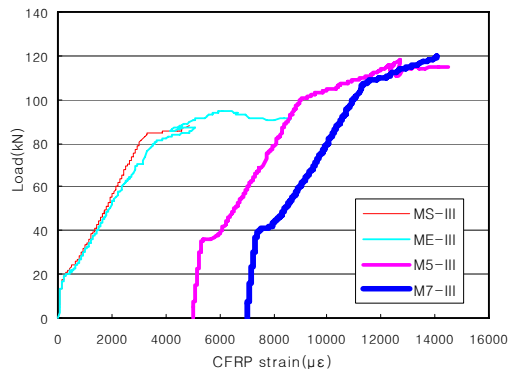


Fig. 8 보강방법별 하중-CFRP판 변형률 곡선

이와 같이 단부정착을 실시하면 CFRP판의 재료성능을 상당한 수준까지 발휘할 수 있으며 특히 대형 정착판과 더불어 프리스트레스를 가하여 보강하는 방법이 균열 저항모멘트의 증가, CFRP판의 재료성능의 100% 발휘 등 구조물의 휨성능의 개선에 가장 유리한 것임을 알 수 있다.

프리스트레스를 가하지 않고 단부정착만 한 경우에 CFRP판이 최대변형률에 못미쳐 파단되는 이유는 최대하중 전에 발생하는 회전단균열의 개구부(opening) 주위에서 모멘트 곡률의 급격한 변화로 CFRP판이 부분적으로 직접적인 인장응력을 받는 것과 더불어 CFRP판에 수직한 응력(peeling stress)이 작용함에 따라 CFRP판 모체(matrix)가 쪼개지고(splitting) 이어서 섬유가 국부적으로 단락(fiber breakage)되기 때문인 것으로 판단된다.^{[9][10]}

3.2 인장철근비의 영향

Fig. 9는 단부정착(E)을 실시한 경우에 콘크리트 강도(M)는 동일하나 인장철근비를 달리한 실험체의 하중-처짐 곡선이다. 철근비가 작은 실험체일수록 CFRP 판이 부담하는 하중이 커짐에 따라 하중-처짐 곡선의 기울기가 작으며 상대적으로 긴 항복구간을 나타내고 있다. 이는 철근비가 작은 실험체에서 인장철근이 일찍 항복에 이르고 철근의 항복 후에는 CFRP판이 단독으로 하중을 부담하나 단부정착 효과로 상당한 수준까지 변형률이 증가하며 연성에 기여하기 때문으로 판단된다.

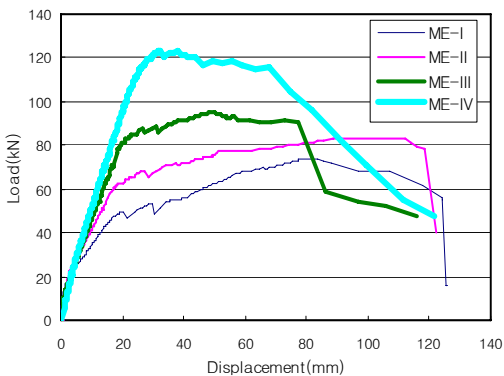


Fig. 9 인장철근비별 하중-처짐 곡선

Fig. 10은 인장철근비에 따른 하중-철근변형률 곡선으로서 초기균열이 발생하는 20kN 근처의 하중이하에서는 인장철근비에 관계없이 철근의 변형률이 거의 동일한 기울기로 증가하다가 콘크리트의 균열 발생 후에는 철근의 하중 부담률이 증가하면서 철근비가 작을수록 동일 하중에 대하여 철근의 변형률이 상대적으로 더 크게 나타나고 있다.

Fig. 11은 인장철근비에 따른 하중-CFRP판 변형률 곡선으로서 인장철근비가 작을수록 동일하중에 대하여 CFRP판의 변형률이 상대적으로 더 크게 나타나고 있으며 최대변형률 또한 더 크게 나타나는 양상을 보이고 있다. 이는 철근비가 작은 구조물을 보강하는 경우에 CFRP판의 조기 부착파괴를 방지하고 최대하중 근처에서의 연성거동의 확보를 위하여 단부정착이 보다 유효함을 보여주는 것이다.

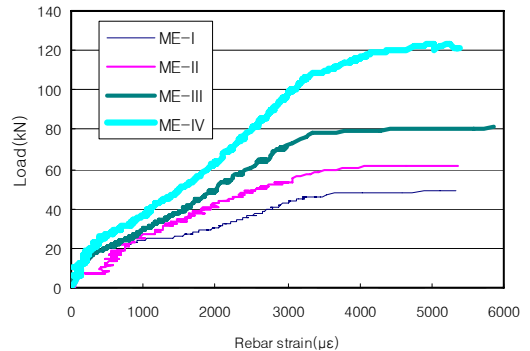


Fig. 10 인장철근비별 하중-철근변형률 곡선

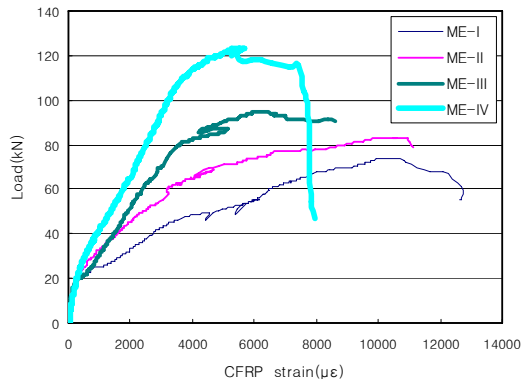
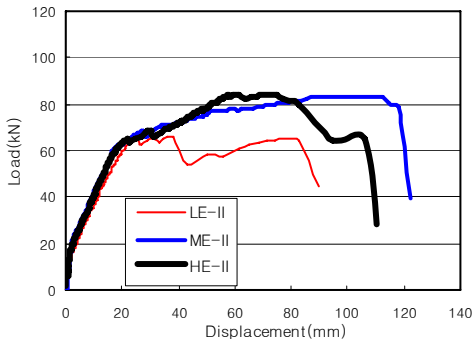


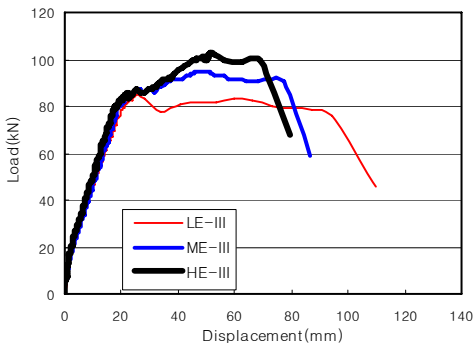
Fig. 11 인장철근비별 하중-CFRP판 변형률 곡선

3.3 콘크리트 강도의 영향

Fig. 12는 단부정착(E)을 실시한 경우에 철근비(Ⅱ&Ⅲ)는 같으나 콘크리트 강도를 달리한 실험체의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. CFRP판으로 보강을 하지 않은 기준실험체에 비하여 철근비가 0.55%인 경우에 최대하중은 저강도(21.8MPa)에서 30.3%은 강도(27.0MPa)에서 61.1%, 고강도(33.0MPa)에서 60.7%가 증가하였고, 철근비가 0.84%인 경우에는 최대하중이 저강도에서 16.7%, 중강도에서 27.7%, 고강도에서 35.8%가 증가하였다. 일반적으로 강도가 커질수록 최대하중의 증가경향이 커지고 있어 강도가 큰 콘크리트에서 단부정착에 의한 보강효과가 상대적으로 크게 발휘되는 것으로 판단되나 실험체 수의 제한으로 경향의 추이를 분



a) 철근비 0.55%



b) 철근비 0.86%

Fig. 12 콘크리트강도별 하중-처짐 곡선

석하기는 어려웠다.

4. 결론

본 연구에서는 CFRP판의 보강방법을 달리하여 RC보의 휨실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 표면부착으로 보강한 실험체가 CFRP판의 박리에 따른 조기 파괴를 방지하고 연성 증대 및 휨성능 개선을 위해서는 단부정착이 필요하다.
- 2) 보강방법으로서 CFRP판을 단순히 표면부착한 경우 무보강 기준실험체에 비하여 파괴하중은 18.4% 증가하였으며, 단부정착을 한 경우는 27.7%가 증가하였고, 단부정착과 더불어 프리스트레스를 가한 경우에는 59.2~60.8%로 매우 큰 휨성능 증대효과를 나타냈다. 이는 CFRP판에 프리스트레스를 가하는 공법이 보강효과 증진에 매우 효율적임을 보여주는 것이다.
- 3) 표면부착만으로 보강하는 경우 FRP판의 변형률이 약 0.48%에서 계면박리 파괴가 발생하나 단부정착을 한 경우에는 0.87%, 프리스트레스를 가하여 단부정착을 한 경우에는 최대변형률이 CFRP의 극한 변형률인 1.2%를 상회하는 것으로 나타나 단부정착을 실시하면 CFRP판의 재료성능을 상당한 수준까지 발휘할 수 있으며 특히 대형 정착판과 더불어 프리스트레스를 가하여 구조물을 보강하는 경우 CFRP판의 재료성능을 거의 100% 활용할 수 있음을 알 수 있다.
- 4) 철근비가 감소할수록 CFRP판이 부담하는 하중이 커지게 되고 연성거동이 CFRP판에 의존하게 됨에 따라 상대적으로 CFRP판의 최대변형률이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 철근비가 적은 구조물의 보강에 단부정착이 보다 유효함을 보여주는 것이다.
- 5) 일반적으로 콘크리트 강도가 커질수록 최대하중의 증가경향이 커지고 있어 강도가 큰 콘크리트에서 단부정착에 의한 보강효과가 상대적으로 크게 발휘되는 것으로 판단되나 실험체 수의 제한으로 경향의 추이를 분석하기는 어려웠다.

참고문헌

1. 박종섭, 정우태, 유영준, 박영환, “탄소섬유쉬트에 의해 휨보강된 RC보의 휨강도 추정”. 콘크리트학회 논문집, 제17권 2호, 2005. 4, pp.213-220.
2. 김태우, “FRP보강 RC보의 조기파괴기준”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제17권 2호, 한국콘크리트학회, 2005. 11, pp.137-144.
3. 심중성, 문도영, 박철우, 박성재, 최광민, “CFRP로 성능향상된 철근콘크리트 보의 Rip-off 파괴메카니즘 고찰”, 콘크리트학회논문집, 제17권 6호, 2005. 12, pp.993-1000.
4. 건설교통부, 한국건설기술연구원, “건축구조물 보수·보강공법의 성능평가에 관한 연구 -탄소섬유쉬트 보강공법을 중심으로-”, ‘99 산학연 공동연구개발사업 최종보고서, 2001. 11, pp.134-158.
5. Triantafillou, T. C., Deskovic, N., and Deuring, M., “Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets”, ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 3, 1992, pp.235-244.
6. International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures, Proceedings and Technical Report on JCI Technical Committee, Japan Concrete Institute, 2003.
7. Garden, H. N., and Hollaway, L. C., “An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates”, Composites Part B, Vol. 29, 1998, pp.411-424.
8. Garden, H. N., and Hollaway, L. C., “An Experimental Study of the Influence of Plate End Anchorage of Carbon Fiber Composite Plates Used to Strengthen Reinforced Concrete Beams”, Composite Structures, Vol. 42, 1998, pp.175-188.
9. Hollaway, L. C., and Mays, G. C., “Structural Strengthening of Concrete Beams using Unstressed Composite Plates”, Strengthening of Reinforced Concrete Structures Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering, Edited by L. C. Hollaway and M. B. Leeming, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 1999, pp.101-109.
10. fib Task Group 9.3 FRP Reinforcement for Concrete Structures, “Externally bonded FRP Reinforcement for RC Structures”, fib, Technical Report on the Design and Use of Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, 2001.

급행 (접수일자 : 2006년 2월 20일)