

CFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 보강효과에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Flexural Strengthening Effect of Reinforced Concrete Beams Flexural Strengthened by CFRP

김재훈* 박성무** 강주원*** 신승협****
Kim, Jae-hun Park, Sung-moo Kang, Joo-won Shin, Seung-hyup

요약

최근 FRP Plate를 이용한 철근콘크리트 구조물의 보수보강 방법으로 많은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 FRP Plate로 보강된 구조물의 경우 보강재 단부의 조기탈락에 대한 문제점이 많은 연구를 통하여 지적되었다.

본 논문은 이러한 보강재 단부의 조기탈락에 대한 대안으로 CFRP Plate 외부부착공법에 있어서 단부를 보강철물을 이용하여 2차적으로 보강하는 방법 및 CFRP-Rod 표면매립공법으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동 및 휨 보강 성능을 파악하는데 그 목적이 있다. 또한 보강 방법에 따른 효과적인 휨 보강 성능을 파악하기 위하여 CFRP Plate 외부부착공법과 CFRP-Rod 표면매립공법을 실험을 통하여 이를 비교·고찰 하여 휨 보강 성능효과를 알아본다.

Abstract

Recently, many researches have been conducted about reinforced concrete structures strengthened with FRP plates. In case of structures strengthened with FRP plates, the issue of premature debonding FRP plate has been raised through many previous researches.

The purpose of this paper is what structural behavior and flexural capacity of reinforced concrete beams which are strengthened for flexure is investigated about the using secondary ironware in the method of external bonded CFRP plate, and the method of near surface mounted CFRP-Rod. Also, in order to evaluate flexural capacity, experiments of the reinforced concrete beams with external bonded CFRP plate and near surface mounted CFRP-Rod have been compared and investigated.

키워드 : 철근콘크리트 보, CFRP Plate, CFRP-Rod, 휨거동

Keywords : reinforced concrete beams, CFRP Plate, CFRP-Rod, Flexural behavior

1. 서론

CFRP Plate 외부부착공법은 보강된 부재의 내력 증가에는 효과적이거나 보강된 구조물이 설계 성능을 다하지 못하고 보강재의 탈락으로 파괴에 이르는 조기파괴(premature failure)의 형태가 앞선 여러 연구자들의 연구에 의해서 확인되었다.

CFRP Plate 외부부착공법의 한계의 극복하고 부착

성능을 개선하려는 노력의 일환으로 CFRP-Rod를 이용하여 보강모체에 매립(filling-up)함으로써, 외부부착공법의 단점으로 지적되고 있는 박락(debonding) 등의 조기파괴를 방지하고, 보강재의 성능이 충분히 발휘되도록 유도하려는 공법들이 제시되고 있다. FRP sheet, laminate 등의 부착공법들과 비교하여 표면매립공법은 향상된 파괴에너지를 가지며, 단부 부착파괴에 대한 저항성이 커지는 것으로 알려져 있다. 또한 화재나 외부충격에 대해서도 안전하고, 마모에 대한 내구성도 커지는 부가적인 효과를 기대할 수 있다.

또한, CFRP-Rod 표면매립 보강공법은 기존 철근콘크리트 구조물에 홈을 파서 보강재를 매입함으로

* 정희원, 영남대학교 건축학부 공학박사
** 정희원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
*** 정희원, 영남대학교 건축학부 조교수, 공학박사
Tel : 053-810-2429 E-mail : kangj@yu.ac.kr
**** 영남대학교 건축학부 석사과정

서 보강재의 탈락현상을 방지하고 충분한 부착성능 확보와 구조물과 보강재의 완전 일체화되는 효과가 뛰어나므로, 기존 보강공법에 비하여 구조성능의 개선은 물론이고 품질관리가 용이하고, 보강 후 구조물의 내구성을 확보할 수 있으므로, 매우 우수한 보강공법인 것으로 판단된다.

2. 보강된 보의 휨 내력 산정

2.1 휨 내력 설계시 기본가정

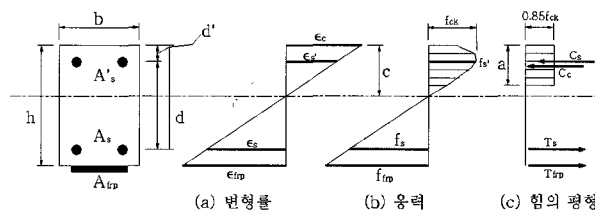
CFRP를 이용한 휨 내력 설계는 극한강도 설계법을 근거로 하여 보강된 보의 항복하중과 최대하중을 산정한다.

휨 보강 이론에서 각 재료에 발생하는 변형률은 중립축에 대해 선형 비례한다(보강재 및 철근은 콘크리트와 일체로 거동하는 것으로 가정한다). 이론식의 유도는 콘크리트 구조설계기준의 휨 이론 기본가정과 사전가력으로 인한 잔류응력의 영향을 무시하고 보강재는 완전 탄성 거동하는 것으로 가정한다.

2.2 휨 내력 설계

이론식은 <Fig. 1>의 변형률과 응력 관계를 이용하며, 그때의 항복하중과 최대하중 산정은 인장 철근이 항복할 때의 모멘트를 항복모멘트, 압축 콘크리트 연단부의 변형률이 $\epsilon_c = 0.003$ 또는 FRP가 파괴 변형률 $\epsilon_{frp,rupt} = f_{frp} / E_{frp}$ 에 도달할 때의 모멘트를 최대모멘트로 간주한다.

$A_s', \epsilon_s', f_s', C_s$ 와 d 는 각각 압축철근의 면적, 변형률, 압축철근의 응력, 압축철근에 작용하는 압축력의 크기, 압축연단에서 압축철근의 중심까지의 거리이다.



<Fig 1> 보강된 복근보의 변형률 및 등가응력분포

중립축 c 의 위치는 변형률 및 힘의 평형 방정식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_s}{d-c} = \frac{\epsilon_{frp}}{h-c} = \frac{\epsilon_s'}{c-d'} \quad (1)$$

$$C_s = f_s' \cdot A_s' \quad (2)$$

$$0.85f_{ck}ab + f_s' A_s' = f_s A_s + E_{frp} \epsilon_{frp} A_{frp}$$

FRP 보강된 보의 모멘트는 다음 식에 의해 구한다.

$$M_n = C_c(d - \frac{a}{2}) + C_s(d - d') + T_{frp}(h - d') \quad (3)$$

파괴 형태가 압축파괴 즉 콘크리트의 압괴에 의한 경우는 콘크리트의 변형률이 극한 변형률 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에 도달하며 식 (1)의 ϵ_c 대신에 ϵ_{cu} 를 대입하여 산정한다.

인장파괴의 경우는 FRP가 파단 될 때이며, 이때 인장철근은 항상 항복($\epsilon_s \geq \epsilon_y$)한다.

3. 실험

3.1 실험 계획

탄소 섬유 막대로 휨 보강된 철근 콘크리트 보의 거동을 고찰하기 위해 총 9개의 철근콘크리트 보 시험체를 동일 단면 및 동일 배근상황을 가지는 복근 장방형 보로 제작하였다. 시험체의 단면은 200mm(폭) × 300mm(높이), 지점간 거리 $L = 2400$ mm로 하고, 양 단부를 150mm씩 돌출시켜 전체 길이는 2700mm로 하였다. 유효층은 표면매립형 CFRP-Rod 삽입시 시험체의 철근배근에 영향이 없도록 피복두께를 50mm로 확보하여 250mm로 설정하였다. 철근은 하부에 2-HD16,

<Table 1> 콘크리트의 압축강도 실험결과

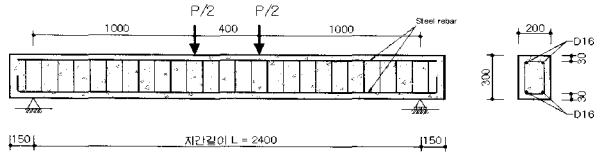
재령 (day)	슬럼프 (mm)	설계기준강도 (MPa)	f_{ck} (MPa)	E_c ($\times 10^4$ MPa)
28일	15	27	27.4	246

<Table 2> CFRP 보강재의 물성치

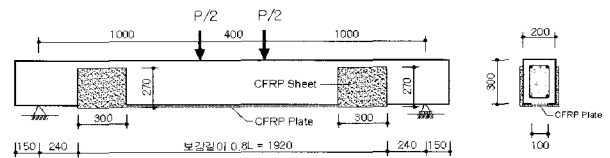
종류	인장강도 (MPa)	인장탄성율 (MPa)	포아송비	파손 변형률 (%)
CFRP	1637	1.53×10^5	0.31	1.2

<Table 3> 시험체 일람

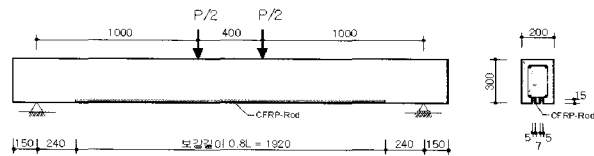
No	시험체명	보강위치	보강재종류	개수	길이	보강면적 (mm ²)	정착물 U자형	비고
1	NB	-	-	-	-	-	-	무보강
2	NPT1-2	보 하부면	PLATE	1	0.8L	15	-	콘크리트 강도 27 MPa
3	NPT1-2E				0.8L		단부	
4	NPT1-2M				0.8L		중앙부	
5	NNT1-2		탄소막대-A형	1	0.8L	0.84	-	
6	NST1-2		탄소막대-B형	1	0.8L	0.35	-	
7	NST2-2				0.8L	0.7	-	
8	NST1-2E				0.8L	0.35	단부	
9	NST1-2M						중앙부	



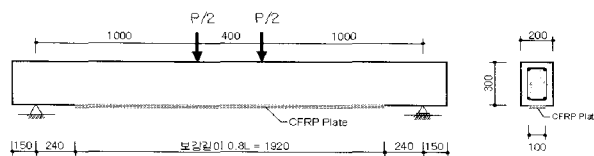
<Fig. 2> 기준 시험체(NB)



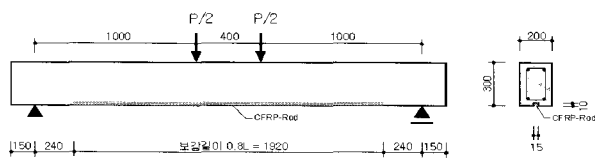
<Fig. 7> 보강재 단부 정착물로 2차 보강 시험체 (NPT1-2M)



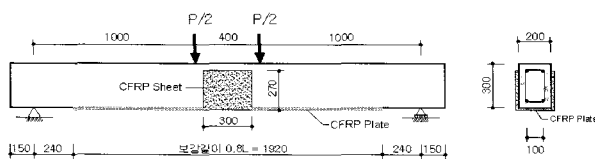
<Fig. 3> CFR-Rod 보강 시험체(NST2-2)



<Fig. 4> CFRP Plate 보강 시험체(NPT1-2)



<Fig. 5> CFRP-Rod 보강 시험체(NST1-2)



<Fig. 6> 보강재 중앙부 정착물로 2차 보강 시험체 (NPT1-2E)

상부에 2-HD16으로 배근량은 최대 철근비($\rho_{max} = 0.0293$)의 약 50%로 배근하였다. 보의 휨 보강 효과를 명확히 보기 위해 즉, 보강 후 전단파괴를 피하기 위해 휨 강도에 비해 전단강도를 크게 설계하여 전단 보강근은 폐쇄형으로 D10철근을 100mm 간격으로 배근하였다.

시험체에 사용된 재료의 물성치는 <Table 1>, <Table 2>에 실험변수의 다른 시험체 명은 <Table 3>에 나타내었다.

3.2 실험 방법

시험은 980kN 만능재료 실험기(U.T.M)를 사용하여 단순지지 조건하에 대칭으로 4점 가력하여 수행하였으며, 각 시험체의 하중상태에 따른 처짐은 DT-100A를 시험체의 중앙부에 설치하여 처짐량을 측정하였다.

주근의 휨 변형 상태를 알아보기 위하여 시험체의 중앙부와 단부의 철근에 1방향 게이지(FLA-5-1L)를 부착하였다. 또한 콘크리트 표면에는 기준식에 의해 계산된 중립축과 압축연단 및 인장연단의 위치에 1방향 게이지(PL-60)를 부착하여 변형도

를 측정하였다. 하중제하에 따른 변위 및 변형도에 관련한 데이터는 DATA LOGGER(TDS-601)로 저장하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 결과

CFRP-Rod로 휨 보강한 RC 보의 최종파괴는 보의 압축콘크리트 압괴에 의한 휨 파괴(flexural failure by crushing of compressive concrete) 및 FRP 보강재 단부에 발생한 응력 집중현상으로 보강재가 단부에서 콘크리트를 물고 떨어지는 부착파괴(Concrete cover separation)가 주된 파괴형상이었으며, CFRP Plate의 경우 접착제와 콘크리트 사이의 접착이 완전하지 못하여 보강재가 충분한 내력을 발휘하지 못하고 부착계면에서 떨어져 나가는 계면박락(plate-end interfacial debonding)이 주된 파괴형상을 나타내었다. 각 시험체별 이론값과 실험값 및 파괴모드는 <Table 4>에 나타내었다.

여기서 이론값은 제 2장의 보강된 보의 휨 내력 산정식을 따랐으며, 이때 재료에 대한 감소계수

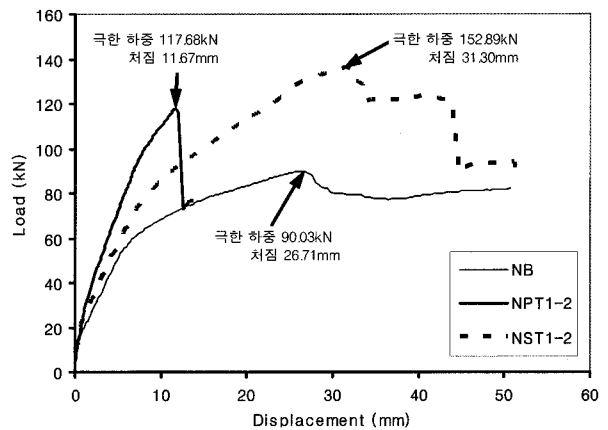
즉, 콘크리트, 철근 및 FRP 보강재의 감소계수를 적용하지 않고 산정한 값이다.

초기균열에서 보강 시험체 전체가 기준 시험체보다 균열하중이 높게 나타났으며, 이때 처짐은 오히려 유사하게 나타나 초기균열 억제 효과를 확인할 수 있었다.

NPT1시리즈 및 NST1시리즈 시험체는 기준 시험체에 비해 하중저항능력이 각각 30.71%~40.52%와 48.68%~51.08%까지 증가하였다. 처짐에 있어서 기준 시험체에 비해 NPT1시리즈의 경우는 극한상태에서 처짐이 크게 감소하였으며, NST1시리즈의 경우는 극한상태에서의 처짐이 크게 증가하였다. 하지만 NST1 시리즈의 경우 동일 하중상태에서 처짐은 기준 시험체에 비해 감소하였다. 따라서 보강 시험체의 휨 강성은 보강하지 않은 시험체에 비해 개선됨을 알 수 있었다.

4.2 보강 방법에 대한 영향

CFRP Plate와 CFRP-Rod로 보강한 RC 보의 내력특성을 평가하기 위하여 시험체들의 하중-처짐



<Fig. 8> 보강 방법에 따른 하중-변위 곡선

<Table 4> 실험결과

시험체명	초기 균열 하중			철근 항복시 하중		극한 상태 하중			내력증가비율 (R', %)	파괴 모드
	이론값 (kN)	측정값 (kN)	처짐 (mm)	측정값 (kN)	처짐 (mm)	이론값 (kN)	측정값 (kN)	처짐 (mm)		
NB	23.54	21.08	1.17	78.85	16.05	74.59	90.03	26.71	-	F
NPT1-2	28.54	35.50	1.67	98.16	7.83	182.23	117.68	11.67	30.71	P
NPT1-2E		36.09	1.63	98.75	8.11		122.39	12.6	35.94	P
NPT1-2M		37.27	1.33	103.17	12.38		126.51	11.31	40.52	P
NNT1-2	23.93	27.26	0.77	89.24	8.55	143.59	152.89	31.3	69.82	F
NST1-2	23.63	25.99	1.18	84.04	9.53	109.05	136.02	31.51	51.08	F
NST1-2	23.83	27.26	1.5	88.26	9.27	134.78	151.61	30.26	68.40	F
NST1-2E	23.63	26.97	0.97	81.49	8.62	109.05	133.86	47.37	48.68	F
NST1-2M		27.75	1.1	86.98	86.98		137.39	32.17	52.61	F

F : Flexural failure P : Plate-end interfacial debonding
 R' : $\frac{\text{보강시험체의 최대하중} - \text{기준시험체의 최대하중}}{\text{기준시험체의 최대하중}} \times 100$

〈Table 5〉 보강방법별 시험체의 하중 및 보강효과

시험체명	보강 방법	보강재	초기 균열하중 (kN)	철근항복시 하중 (kN)	극한상태하중		내력증가 비율 (R' ,%)	극한상태 실험값 (이론값)
					이론값 (kN)	실험값 (kN)		
NB	-	-	21.08	78.85	78.85	90.03	-	1.14
NPT1-2	외부 부착	탄소판 (단면적150mm ²)	35.50	98.16	213.00	117.68	30.71	0.55
NST1-2	표면 매립	탄소막대B (단면적35mm ²)	25.99	84.04	125.92	136.02	51.08	1.08

관계를 <Fig. 8>에 나타내었으며, 보강 시험체의 하중-처짐 곡선은 전반적으로 무보강 시험체 NB와 다른 곡선 이력을 보이고 있는데, 무보강 시험체의 경우보다 최대하중이 증가하였고, 특히 CFRP Plate로 보강된 NPT1-2 시험체 극한하중 이후 보강재의 조기 박락 등으로 인하여 급격한 내력저하를 보이고 있음을 알 수 있다.

<Table 5>의 보강방법에 따른 시험체의 하중 및 보강효과에서 CFRP Plate 외부부착공법으로 보강한 NPT1-2 시험체의 경우 항복하중이 98.16kN, 처짐이 7.83mm로서 초기강성이 1.28로 CFRP-Rod 표면매립공법으로 보강한 NST1-2(초기강성, 0.9) 시험체보다 큰 것으로 나타나지만, 극한상태 하중에서 FRP Plate의 경우 실험에 의해 확인된 실험값이 강도설계법에 의해 산정된 이론값의 약 55% 정도인 반면에 CFRP-Rod로 보강된 시험체는 108%로 실험값과 이론값이 거의 같게 나타난다. 이는 CFRP Plate 보강 시험체가 철근의 항복이후 발생한 시험체와 보강재의 사이에 수평균열의 진전으로 인하여 탄소판 조기 박락에 기인한 것으로 판단된다.

최대내력을 무보강 시험체와 비교하면, 외부부착공법으로 보강한 NPT1-2와 표면매립공법으로 RC 보를 보강한 NST1-2의 경우 각각 30.71%, 51.08%의 내력증가를 보였다. 따라서 표면매립공법의 경우 보강재와 콘크리트 사이의 부착력이 외부부착공법보다 유리하여 내력증가의 효과가 큼을 알 수 있다.

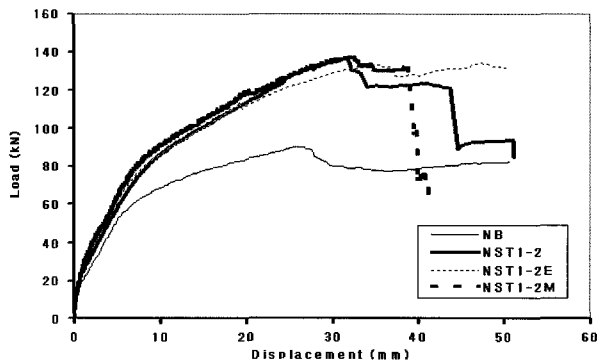
4.3 단부 및 중앙부 보강 정착물 유무에 대한 영향

<Table 6>에서 보강재의 조기탈락을 막기 위해 CFRP 시트로 U자형 스트립 보강 정착물을 설치한 경우 CFRP Plate는 1.04~1.08, CFRP-Rod는 0.98~1.01의 하중 변화를 보였다. 근소한 차이를 나타내지만 U형 스트립 보강 정착물은 CFRP Plate 보강 쪽이 유리하며, 양단부 보다 중앙부 보강 시험체가 하중의 증가에 유리함을 알 수 있다.

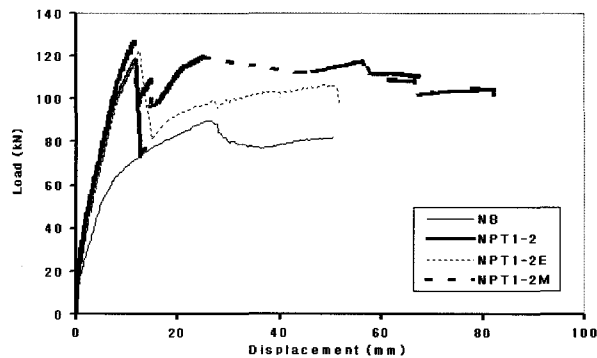
<Fig. 9>의 CFRP-Rod 표면매립공법의 경우, 보강 정착물의 보강 효과가 나타나지 않았는데 이는 CFRP-Rod와 콘크리트 보가 일체 거동을 하기 때문

〈Table 6〉 U형 스트립 보강 정착물의 유무에 따른 하중 및 보강효과

시험체명	U형 스트립 보강위치	초기균열하중 (kN)	철근항복시하중 (kN)	극한상태하중		내력증가 비율 (R' ,%)	U형 스트립 보강 효과
				이론값 (kN)	실험값 (kN)		
NB	-	21.08	78.85	78.85	90.03	-	-
NPT1-2	-	35.50	98.16	213.00	117.68	30.71	1
NPT1-2E	단부	36.09	98.75		122.39	35.94	1.04
NPT1-2M	중앙부	37.27	103.17		126.51	40.52	1.08
NST1-2	-	25.99	84.04	125.92	136.02	51.08	1
NST1-2E	단부	26.97	81.49		133.86	48.68	0.98
NST1-2M	중앙부	27.75	86.98		137.39	52.61	1.01



<Fig. 9> U형 스트립 보강 시험체의 하중-처짐 곡선 (CFRP-Rod)



<Fig. 10> U형 스트립 보강 시험체의 하중-처짐 곡선 (CFRP Plate)

으로 판단되며, <Fig. 10>의 CFRP Plate 외부부착 공법의 경우, U형 스트립 보강 정착물의 측면이 휨 균열의 진전에 따라 찢어지므로 인해 보강효과를 충분히 발휘하지 못한 것으로 판단된다. 따라서, CFRP 시트로 U자형 스트립 보강할 경우 U형 보강재의 파단을 막기 위하여 U형으로 보강시 접합부의 굴곡면에 대한 면처리가 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서 CFRP-Rod 표면매립공법으로 보강한 RC 보의 보강효과를 파악하기 위한 실험적 연구를 수행하였고, 실험변수에 따른 휨 거동 특성을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CFRP-Rod를 표면매립하여 보강한 RC 보의 파괴형상은 기준 시험체인 NB 시험체와 동일한

휨 파괴를 나타내고 있으며, CFRP Plate 외부부착 보강한 RC 보의 경우 계면박리로 인한 조기박리를 보였다. 따라서 CFRP-Rod 표면매립공법이 CFRP Plate 외부부착공법보다 1.16~1.3배 정도의 내력 증가를 보여줌으로 표면매립형 CFRP-Rod가 외부부착형 CFRP Plate 보다 부착 성능이 우수한 것으로 판단된다.

2. CFRP-Rod를 표면매립한 NST시리즈 시험체의 경우 극한하중에 대한 내력증가는 이론값을 기준으로 실험값은 0.98~1.08배로 이론값과 유사하게 나타났다. 따라서 적절한 강도감소계수를 고려한다면 보강설계에 있어서 기존의 극한강도 설계법을 적용한 설계식의 사용이 가능한 것으로 판단된다.
3. CFRP Plate를 외부부착하여 보강한 NPT시리즈 시험체의 경우 0.55~0.59배로 이론값의 절반정도의 내력밖에는 발휘하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 인장 철근의 항복 이후 보강재의 조기박리로 인하여 보강된 RC 보의 휨 내력을 발휘하지 못한 것으로, CFRP Plate 외부부착 보강 설계시 조기박리에 대한 충분한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
4. 보강방법별 보강효과를 보면, CFRP Plate 외부부착공법으로 보강한 NPT1-2시험체의 경우 항복 전 보강효과는 탄소막대를 매입한 시험체의 경우보다 좋으나, 철근의 항복 이후 시험체 중앙부에서 콘크리트와 보강재의 사이에서 발생한 수평균열의 진전에 의한 보강재 조기박리로 인하여 보강성능을 발휘하지 못하고 파괴되었다. CFRP Plate 외부부착공법으로 보강한 NPT1-2의 경우 기준 시험체인 NB에 대한 내력증가 비율은 30.71%, CFRP-Rod 표면매립공법으로 보강한 NST1-2의 경우 51.08%의 내력증가를 보였다. 따라서, 매립공법의 경우 보강재와 콘크리트 사이의 부착력이 외부부착공법보다 유리하여 내력증가에 더 효과적임을 알 수 있다.
5. CFRP 시트 보강정착물을 U자형 스트립 형태로 보강한 경우 CFRP-Rod 표면매립형은 보강정착물이 없는 시험체와 비교하였을 경우 약 0.98~1.01로 보강 효과가 거의 없었다. CFRP

Plate 외부부착의 경우는 약 1.04~1.08로 작은 차이를 보였다. 이는 CFRP-Rod 표면매립형은 콘크리트 보와 일체로 거동하나. CFRP Plate 외부부착 시험체의 최종 파괴는 보강재의 조기박리에 의한 것으로 보강재의 조기박리가 보의 내력에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. CFRP Plate 외부부착의 경우 U형 스트립을 중앙부에 설치한 경우가 보강재 단부에 설치한 것보다 작은 차이지만 효과적으로 나타났다. 또한 U자형 스트립 보강 정착물의 측면이 휨 균열의 진전에 따라 찢어지므로, U자형 스트립 보강 정착물로 보강할 경우 U형 보강재의 파단을 막기 위하여 콘크리트 모서리의 면처리에 대하여 고려되어야 할 것으로 판단된다.

6. CFRP-Rod 표면매립공법으로 보강한 시험체가 CFRP Plate 외부부착공법으로 보강한 시험체보다 휨 내력에 대한 보강효과가 뛰어난을 알 수 있다.

참고문헌

1. 이리형, 이용택, 하상수. "FRP로 보강된 R/C 보의 휨내력 향상효과에 관한 실험연구," 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권, 1호, pp.119~122, 1999.
2. 한만엽, 이원창. "사용중 보강되는 부재의 보강설계법 연구," 콘크리트학회 논문집, 제11권, 3호, 1999.
3. 프리믹스형 보수재료를 적용한 R/C 구조물의 보수 및 섬유보강공법 개발, 건설교통부, 1998년, 11.
4. 오병환, 조재열, 강동욱. "강판 휨 보강된 철근 콘크리트 보의 구조적 거동," 한국 콘크리트 학회지, 제9권 5호, pp.233~244, 1997.
5. 이수진, "FRP로 외부 보강된 철근 콘크리트 보의 보강 변수 영향에 관한 연구," 이화여자대학교 과학기술대학원, 2000년, 11.
6. S. T. Smith., J. G. Teng., "FRP-strengthened RC beams. I : review of debonding strength models," Engineering Structures 24, pp.385~395, 2002.
7. S. T. Smith., J. G. Teng., "FRP-strengthened RC beams. II : assessment of debonding strength models," Engineering Structures 24, 2002, pp.397~417.
8. Oehlers & Bradford, "Composite Steel and Concrete Structural Members", Pergmon, 1995.
9. ACI Committee 440, "Guidelines for The Selection, Design, and Installation of Fiber Reinforcement Polymer(FRP) Systems for External Strengthening of Concrete Structures", American Concrete Institute, 1999.
10. T. M. Roberts. "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams", The Structural Engineer, Vol 67, No12, pp.229~233, 1989.