

CFRP로 보강된 RC보의 부착상세에 따른 보강효과

Strengthening Effects of R.C. Beams using Externally attached CFRP Composites with Bond Details

박종섭* 박영환** 조정래*** 유영준**** 정우태***
Park, Jong Sup Park, Young Hwan Cho, Jeong Rae You, Young Jun Jung, Woo Tae

ABSTRACT

Many studies have dealt with strengthening by epoxy-bonded CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) composites. However, the effects of various influencing factors have not been clarified on the behavior of strengthened RC beams.

This study was performed to verify the effects of strengthening due to various bond details of externally attached CFRP Composites. In this study, major test parameters include the bond type and the anchor type. The deflections, failure load, strain of reinforcing bar, concrete and CFRP are measured at each loading step. The failure mode and debonding loads(ultimate loads) are analysed from these measured data.

According to the test results, all specimens are failed by intermediate flexural crack induced interfacial debonding.

1. 서론

성능이 저하된 철근콘크리트 구조물에 대한 성능 향상기술은 매우 다양하게 개발되어왔다. 과거에 많이 사용되던 강판 보강공법은 부식 및 중량의 증가 등과 같은 문제로 인해 최근에는 적용 예가 많지 않으며, 대신 복합재료(Composite Polymer)를 보강재로 이용하는 사례가 급증하고 있다. 특히, 접착제를 사용하여 탄소섬유 폴리머(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer)를 콘크리트에 부착하는 보강방법이 주목받고 있다. 이 같은 부착방식 보강기술은 콘크리트와 보강재 사이의 계면거동이 보강 효과에 큰 영향을 미치고 계면에서의 파괴가 구조물의 휨성능을 좌우하는 예가 많은 것으로 보고되고 있으며 특히 단부에서의 응력집중은 이러한 계면파괴를 유발하는 중요한 인자로 인식되어 왔다.

따라서, 본 연구에서는 탄소섬유 폴리머를 이용한 기존의 보강기술에 대한 문제점을 파악하고 이를 개선시키기 위한 노력으로 CFRP 보강재 단부의 부착상세를 달리한 RC보에 대한 휨 실험을 실시하였으며, 단부부착형태 및 정착형태에 따른 파괴모드와 휨보강 효과에 대해 검토하였다.

2. 변수결정을 위한 예비시험

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

**** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

2.1 예비시험 개요

CFRP의 단부부착상세 변화에 따른 보의 휨성능 실험을 수행하기에 앞서 본 연구에서는 각각의 부착상세별 직접전단 실험을 실시하여 부착상세별 부착강도의 변화를 고찰하였다.

예비시험에 사용된 시험체명과 시험변수는 표 1에 나타낸 바와 같으며 시험체의 형상 및 제원은 그림 1에 나타내었다.

표 1 예비시험체 명칭 및 변수

시험체명	변수설명
Control	CFRP슈트-콘크리트 부착강도 기준시험체
Thick	CFRP슈트 보강재 단부 두께 증가(보강재 섬유 동일방향)
Wide	CFRP슈트 보강재 단부 부착면적 증가(단부 보강재 직각방향)
Steel 1, 2	CFRP슈트 보강재 단부 강판 매립 1, 2
CFRP-Pre 1, 2	CFRP판-강판 부착강도 시험체 1, 2

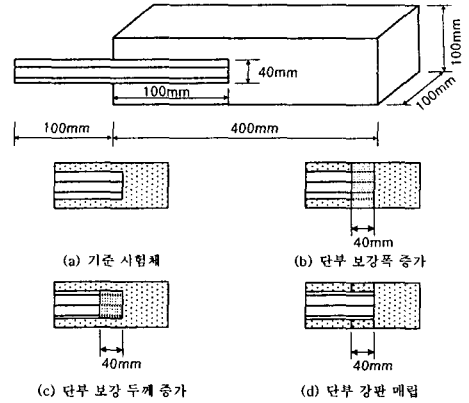


그림 1 예비시험체의 형상 및 제원

표 2 CFRP슈트 보강 예비시험체의 최대하중 및 부착강도

시험체명	최대하중 (kgf)	부착길이 (cm)	부착면적 (cm ²)	부착강도 (kgf/cm ²)	최대하중 비(%) (최대하중/Control)
Control	897.43	10	40	22.44	100.00
Thick	1,215.41	10	40	30.39	135.43
Wide	1,189.24	10	64	18.58	132.52
Steel1	1,334.20	4	16	83.39	148.67
Steel2	1,367.76	4	16	85.48	152.41
CFRP-Pre1	2,978.47	10	50	59.57	-
CFRP-Pre2	3,118.06	10	50	62.36	-

2.2 예비시험 결과 및 분석

예비시험은 5tonf의 만능시험기를 통해 1mm/min의 가력속도로 변위제어방법을 통해 실시하였다. 실험결과 모든 시험체는 콘크리트와 CFRP의 계면 또는 강판과 CFRP 계면에서의 부착파괴로 시험이 종료되었다. CFRP슈트 단부에 미리 강판을 매립하고 그 위에 슈트를 부착한 경우에 가장 높은 부착강도를 발현하는 것으로 나타났으며, 강판에 부착된 CFRP슈트의 부착강도는 모두 예폭시의 인장강도인 75kgf/cm²을 상회하는 것으로 나타났다. 또한 부착면적을 변화시키지 않고 단부 CFRP슈트의 두께만 증가시킨 Thick 시험체는 기준시험체에 비해 최대하중과 부착강도가 약 35% 증가하는 것으로 나타났다. 한편 Wide 시험체의 경우에 최대하중은 증가하는 것으로 나타났으나 확대된 면적과 비례하여 증가하지는 않는 것으로 나타났다.

CFRP판 시험체에서는 강판과의 부착강도가 평균 60kgf/cm²인 것으로 나타나 CFRP슈트에서와 같이 탁월하게 부착성능이 향상되지는 않는 것으로 나타났다. 표 2에는 CFRP슈트 및 CFRP판 예비시험체의 최대하중 및 부착강도를 나타내었다.

3. 철근콘크리트 보의 휨보강 실험

3.1 실험 개요

CFRP쉬트 및 판에 의해 보강된 철근콘크리트보의 휨보강 성능을 파악하기 위하여 그림 2와 같이 폭:높이가 1:1.5, 단면높이 : 지간길이가 1:10인 철근콘크리트보를 제작하였다. 모든 시험체는 보강된 이후에도 휨파괴에 앞서 전단파괴가 발생하지 않도록 D10의 스티럽을 10cm 간격으로 배치하였으며 휨인장 파괴를 유도하기 위하여 D13 철근 3개를 압축철근으로 사용하였다. 시험체 보강에는 국내 H사의 무수지탄소섬유쉬트와 국외 C사의 CFRP판을 사용하였다. 실험체 제작에는 설계강도 270kg/cm²의 콘크리트와 인장강도 4000kg/cm² 이상의 철근을 사용하였다. 보강에 사용된 CFRP 보강재료의 주요 물성은 표 3~4에 나타내었다. 실험은 4점 재하 형태로 변위제어를 통해 진행하였으며, 변형률 게이지와 변위계를 이용하여 하중 단계별 응답을 측정하였다.

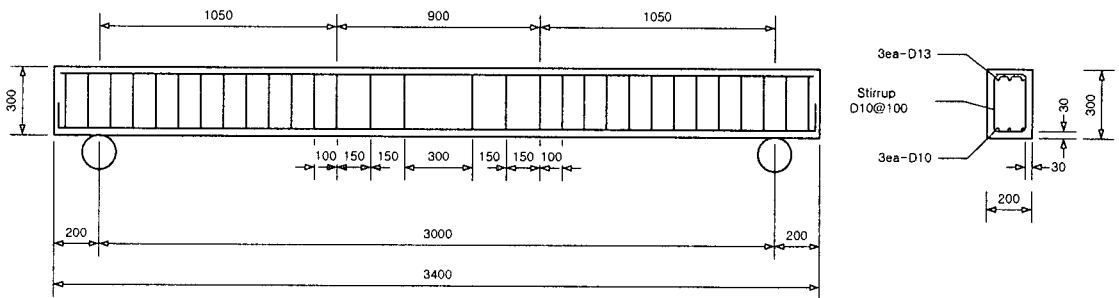


그림 5 철근콘크리트 보 시험체의 제원

표 3 CFRP쉬트 및 보강 접착제의 물성

사용재료	항목	물성값
무수지탄소 섬유쉬트	설계인장강도(kgf/cm ²)	35,500
	설계인장강도(kgf/cm ²)	51,248
	설계인장탄성률(kgf/cm ²)	2,350,000
	인장탄성률(kgf/cm ²)	2,879,186
	파단변형률(%)	1.50
	설계두께(cm)	0.011
	시공두께(cm)	0.045

표 4 탄소섬유판 및 보강 접착제의 물성

사용재료	항목	물성값
CFRP판	탄성계수(kgf/cm ²)	1,683,674
	인장강도(kgf/cm ²)	28,571
	파단변형률(%)	1.70
	폭(cm)	5.00
	두께(cm)	0.12

표 5 휨보강 실험체명 및 실험변수

실험체명	압축 강도	보강재	부착 방식	단부 처리	하중 위치	비고	실험체명	압축 강도	보강재	부착 방식	단부 처리	하중 위치	비고
CONTROL	270	-	-	-	105		SHLP227	270	쉬트	부착	-	60	
CON27PL	270	판	부착	-	105		CPLP227	270	판	부착	-	60	
CON27SH	270	쉬트	부착	-	105		SHCWB27	270	쉬트	부착	저판, 뒷개	60	용접
PLSUB27	270	판	부착	저판매립	105	30cm	SHCWU27	270	쉬트	비부착	저판, 뒷개	60	용접
SHSUB27	270	쉬트	부착	저판매립	105	10cm	CPCWB27	270	판	부착	저판, 뒷개	60	용접
SHWDB27	270	쉬트	부착	폭확대	105	10cm	CPCWU27	270	판	비부착	저판, 뒷개	60	용접
SHTIB27	270	쉬트	부착	두께증가	105	10cm	CPCBU27	270	판	비부착	저판, 뒷개	60	볼트

3.2 실험 변수

RC보에 대한 휨보강 성능 실험에서는 앞서 예비시험을 통해 효용성을 검토했던 CFRP 단부 부착

형태, 단부 정착 형태에 따른 휨거동 특성을 검토하기 위하여 표 5 및 그림 3, 4와 같은 실험변수를 설정하였다. 여기서 비부착 방식은 콘크리트와 CFRP 사이에 에폭시 접착제를 전혀 사용하지 않고 양단에 설치된 정착장치를 통해 보강력이 전달되는 보강방법을 의미한다. 한편 본실험에서는 가력위치가 보강효과에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하기 위해 두 가지 가력위치(지점에서 거리 105cm, 60cm)에 대해 실험이 실시되었다. 동일한 CFRP로 보강하는 경우 보강길이, 보강매수, 보강폭은 모두 동일하게 하였다. CFRP쉬트 보강실험체의 보강길이 및 보강폭은 각각 290cm, 12cm로 모든 실험체가 동일하며, 단부 부착형태에 의해 단부에서 두께가 변화되는 경우를 제외하고는 모든 실험체의 보강매수도 2매로 동일하다. CFRP판 보강실험체의 경우에도 보강길이는 CFRP쉬트 보강실험체와 동일하며 모든 실험체가 폭 5cm인 CFRP판 1매로 보강되었다.

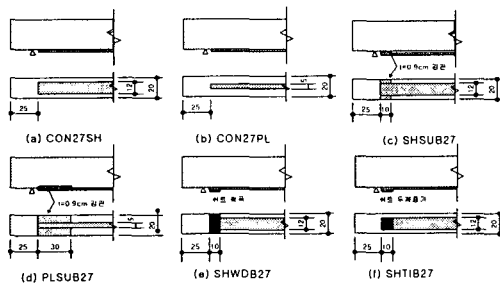


그림 6 단부 부착형태

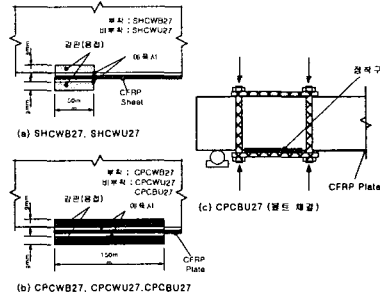


그림 7 단부 정착형태

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 파괴모드

철근콘크리트 보를 CFRP와 같은 외부보강재로 보강한 경우 부착파괴는 콘크리트와 보강재 계면의 성능에 따라 다양한 형태로 나타나지만 보통 보강재 끝단에서 부착파괴(박리)가 시작되는 단부 부착파괴와 내부 균열부에서부터 박리가 진행되는 중간 부착파괴로 분류할 수 있다. 단부 부착파괴는 보강재 단부에 발생한 큰 계면응력에 기인한 것으로 충분한 정착길이를 확보하지 않았을 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다. 중간 부착파괴는 콘크리트의 균열부에 집중된 응력 및 균열부의 기하학적인 형상에 기인한 것으로 균열부에서 박리가 시작되어 단부 또는 보의 안쪽으로 파괴가 진행되는 형상으로 나타난다. 본 연구에서 실험된 CFRP쉬트로 보강된 보의 경우 일반적으로 이용되고 있는 설계 부착강도 6kgf/cm^2 를 적용할 때 필요한 정착길이는 130cm이므로 본 연구에서 사용된 실험체는 설계상으로는 모두 단부 부착파괴가 발생되어야 한다. 그러나, 실험체에서는 하중재하점 아래 또는 순수 휨구간 내에 발생한 균열부에서 부착파괴가 시작되어 단부쪽 또는 중앙부쪽으로 급격히 진행되는 중간 부착파괴 모드만이 관찰되었다. 이러한 파괴 모드를 나타내게 된 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 전단파괴를 방지하기 위해 충분히 배치된 전단철근에 의해 사인장균열은 억제된 반면, 실험변수별 보강효과를 비교하기 위해 저보강한 인장철근 때문에 실험체에 휨균열이 크게 발생되었고 이로 인해 단부 부착파괴모드가 아닌 중간 부착파괴모드가 나타나게 된 것으로 판단된다.

한편 CON27SH와 SHTIB27의 경우, 균열부에서 박리가 발생하면서 박리에 의한 충격에 의해 순수 휨구간 내의 쉬트가 파단되는 파괴양상을 나타냈으며 보강재 단부 부착형태를 변화시킨 SHWDB27의 경우에는 부착면적이 넓어지는 단부에서 부착파괴를 지연시키는 효과를 보였으나 최종적인 부착파괴

를 방지하지 못하였다. 또한 보강재 단부에 강판을 매립하여 부착강도를 증가시키고자 했던 SHSUB27의 경우에도 실제 부착파괴의 시작이 보강재 단부가 아닌 하중재하점 하단부에서 발생하면서 단부의 강판이 부착파괴 억제에 기여하지 못하는 것으로 나타났다. 부착파괴가 일어난 모든 실험체는 하중가력점 하단부 또는 중앙부에서 부착파괴의 진행이 시작되었으며 파괴 양상은 하중의 재하위 치와는 무관하게 동일한 양상으로 파괴되는 것으로 나타났다.

표 6 단부 부착형태에 따른 보강효과

실험체명	항복하중 (P _y , tonf)	최대하중 (P _{max} , tonf)	P _y / P _{yCONT}	P _{max} / P _{maxCONT}
CONTROL	4.79	5.25	1.00	1.00
CON27SH	6.17	9.11	1.29	1.74
SHSUB27	6.45	8.91	1.35	1.70
SHWDB27	6.73	8.92	1.41	1.70
SHTIB27	6.42	9.05	1.34	1.72
CON27PL	6.55	8.01	1.37	1.53
PLSUB27	7.39	9.34	1.54	1.78

표 7 단부 정착형태에 따른 보강효과

실험체명	항복하중 (P _y , tonf)	최대하중 (P _{max} , tonf)	P _y / P _{yCONT}	P _{max} / P _{maxCONT}
CONT27	9.09	10.39	1.00	1.00
SHLP227	12.11	16.28	1.33	1.57
SHCWB27	11.63	17.23	1.28	1.66
SHCWU27	9.92	15.09	1.09	1.45
CPLP227	12.81	17.43	1.41	1.68
CPCWB27	13.44	22.11	1.48	2.13
CPCWU27	10.28	17.60	1.13	1.69
CPCBU27	10.35	17.97	1.14	1.73

4.2 단부 부착형태에 따른 보강효과

단부 부착형태를 변수로 하여 실시된 실험결과 CFRP쉬트 및 CFRP판 보강보의 무보강 기준실험체에 대한 보강효과비를 표 6에 정리하였다. CFRP쉬트 보강실험체의 경우, 단부 부착형태에 따라 무보강 실험체에 비해 항복하중은 29~41%까지 증가하는 것으로 나타났으며, 최대하중은 70~74%까지 증가하는 것으로 나타났다. 단부 부착형태를 변화시킨 실험체의 항복하중비는 부착형태를 변화시키지 않은 일반적인 방법에 비해 항복하중비는 5~12% 증가되었지만, 최대하중비는 오히려 2~4% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 균열부에서 부착파괴가 진행되어 급속히 단부쪽으로 박리가 진행되는 경우, 단순한 단부 부착형태의 개선만으로는 부착성능 및 보강효과를 향상시킬 수 없다는 것을 의미하기도 한다.

한편, CON27SH와 SHTIB27의 경우에는 박리 후 CFRP쉬트가 파단되는 파괴를 보였으나 보강효과는 단부에 강판이 매립된 SHSUB27, 단부의 폭이 확대된 SHWDB27과 비슷하였다. 이와 같이 CFRP쉬트가 파단되었으나 보강효과가 향상되지 못한 원인은 쉬트에 발생된 인장응력의 증가로 쉬트가 파단되지 않고 박리가 급격히 진행되면서 발생하는 충격이 원인이라고 판단된다. 이 같은 파괴 메커니즘에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

CFRP판 보강실험체의 경우에는 무보강 기준실험체에 비해 항복하중은 부착형태별로 각각 37, 54%가 증가하는 것으로 나타났으며, 최대하중은 각각 53, 78%가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 부착형태별로는 일반적인 부착방법으로 시공된 CON27PL 실험체에 비해 강판을 매립하고 부착한 PLSUB27 실험체의 최대하중비가 25% 증가하는 것으로 나타났다.

4.3 단부 정착형태에 따른 보강효과

무보강 기준실험체인 CONTROL에 대한 단부 정착 보강실험체의 보강효과는 표 7과 같다. 표 7에 따르면 단부 정착 보강실험체중 보강재가 부착되어 있는 실험체인 SHCWB27과 CPCWB27은 단부가

정착되지 않은 실험체에 비해 각각 9%, 45% 최대하중비가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 단부 정착으로 인한 항복하중의 증가율은 단부가 정착되지 않은 실험체와 거의 유사한 것으로 나타났다.

한편, 단부 정착 실험체중 비부착 실험체는 무보강 실험체에 비해 항복하중 증가비가 약 10% 이내인 것으로 나타나 비합성된 보강재는 철근의 응력을 거의 분담하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 최대하중에 있어서는 SHCWU27의 경우 일반적인 부착방법에 의해 시공된 SHLP227보다 오히려 최대하중이 낮아지는 것으로 나타났으며, CPCWU27 및 CPCBU27은 CPLP227과 동일한 최대하중 증가비율을 나타내었다.

실험결과에 따르면, SHLP227이 부착파괴가 발생한 시점과 유사한 시점에서 SHCW27 또한 부착파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 단부정착에 의해서도 경간 내부에서의 휨 균열에 의한 보강재 부착파괴는 지연시키거나 방지할 수 없는 것으로 판단된다. 또한 CFRP판 보강실험체인 CPCW27도 CFRP쉬트 보강실험체와 마찬가지로 일반적인 부착방법에 의해 시공된 CPLP227과 동일한 시점에서 경간 내부의 보강재가 부착파괴를 일으키는 것으로 나타났다.

5. 결론

철근콘크리트 보에 대해 CFRP쉬트 및 탄소섬유판을 이용하여 휨보강을 실시한 후 실시된 정적실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 실험된 보강보는 내부 균열부에서 부착파괴가 시작되는 중간 부착파괴모드를 보였다. 이러한 파괴모드로 인해 CFRP쉬트의 단부 부착형태를 변화시켜 보강한 보의 경우 보강효과는 일반적인 부착형태의 보강보와 차이를 보이지 않았다. CFRP판으로 보강한 경우에는 단부 부착형태 변경에 따라 보강효과가 개선되는 효과가 있었다.

(3) 균열부에서 부착파괴가 시작되어 단부 또는 중앙부쪽으로 급격히 부착파괴가 진행되는 파괴에 대응하기 위해서는 충격 에너지를 완화시키는 별도의 조치가 필요하다고 사료된다.

(4) 단부를 정착시키면 보강효과가 개선되었으며 연성확보에도 효과적인 것으로 파악되었다.

(5) 비부착 보강방식은 보강재를 유효하게 사용할 수 있다는 점, 연성확보에 유리하다는 점, 시공을 간편화시킨다는 점 등 다양한 이점이 있는 보강공법이므로 이를 보완시키기 위한 기계적 정착장치 등에 대한 연구·검토가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., FRP Strengthened RC Structures, John Wiley & Sons, LTD, 2001.
2. 한국건설기술연구원, 노후 교량의 성능향상 기술 개발, 2002. 12.
3. Spadea, G., Bencardino, F., and Swamy, N., Strengthening and Upgrading Structures with Bonded CFRP Sheets (Design Aspects for Structural Integrity), Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium (FRPRCS 3), Vol.1, Sapporo, Japan, 1997, pp629-636.