

부착길이와 복부정착이 CFRP판으로 보강된 RC 보의 휨 보강효과에 미치는 영향

박상열¹⁾*

¹⁾ 제주대학교 지구환경시스템공학부
(2001년 10월 26일 원고접수, 2002년 8월 7일 심사완료)

Effect of Bond Length and Web Anchorage on Flexural Strength in RC Beams Strengthened with CFRP Plate

Sang-Yeol Park¹⁾*

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Cheju, 690-756, Korea
(Received October 26, 2001, Accepted August 7, 2002)

ABSTRACT

This paper presents the flexural behavior and strengthening effect of reinforced concrete beams bonded with carbon FRP plate. Parameters involved in this experimental study were plate bond length and sheet web anchorage length. Test beams were strengthened with FRP plate on the soffit and anchored with FRP sheet on the web. In general, strengthened beams with no web anchorage were failed by concrete cover failure along the longitudinal reinforcement. On the other hand, strengthened beams with web anchorage were finally failed by delamination shear failure within concrete after breaking of CFRP sheet wrapping around web. The ultimate load and deflection of strengthened beams increased with an increased bond length of FRP plate. Also, the ultimate load and deflection increased with an increased anchorage length of FRP sheet. Particularly, the strengthened beams with web anchorage maintained high ultimate load resisting capacity until very large deflection. The shape of strain distribution of CFRP plate along beam was very similar to that of bending moment diagram. Therefore, an assumption of constant shear stress in shear span could be possible in the analysis of delamination shear stress of concrete. In the case of full bond length, the ultimate resisting shear stress provided by concrete and FRP sheet increased with an increase of web anchorage length. In the resisting shear force, a portion of the shear force was provided by FRP anchorage sheet.

Keywords : strengthening, carbon FRP, bond length, web anchorage, concrete cover failure, delamination shear failure

1. 서 론

FRP(fiber reinforced polymer) 복합재료는 비부식성, 고강도, 경량성, 비전기전자성 등의 장점으로 미래 건설산업에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 특히 FRP 쉬트나 판의 부착을 통한 콘크리트 구조물의 보강공법은 현재 활발히 적용되어지고 있는 중이다. 기존 콘크리트 구조물의 결함들은 여러 가지 원인으로부터 발생하고 있는데 세월에 따른 일반적인 노후화에서부터 상세설계의 오류, 시공 시 품질관리의 소홀, 부적절한 유지관리 등이 있다. 그러나 보수만으로 현재의 하중지지 능력에 대한 기준을 만족할 수 없는 경우가 많은데 이때는 구조물의 보강에 대하여 고려하여야 한다.

이제까지 외부 프리스트레싱 보강공법이나 외부 강관 부착공법이 기존 콘크리트 부재의 하중 지지능력을 향상시키는데 비교적 성공적으로 이용되어 왔다. 그러나 외부 프리스트레싱 공법은 기존 부재에 정착단과 deviator의 설치 용이하지 않으며 외부에 노출된 프리스트레싱 강재의 부식에 대하여 끊임없는 점검과 유지보수가 필요하다. 한편, 외부 강관 부착공법은 부식에 의하여 콘크리트와 강관의 부착력에 대한 신뢰성을 감소시키고 높은 중량과 이음으로 시공성이 매우 떨어지는 단점을 가지고 있다. 고강도 FRP 쉬트나 판을 이용한 부착공법은 이러한 강관 부착공법의 단점을 제거할 수 있는 비부식성, 높은 인장력, 경량성, 제한 없는 길이 등의 장점으로 안전성과 시공성을 확보하고 있다¹⁾. 따라서 FRP 쉬트나 판은 구조적으로 부재의 하중지지능력을 향상시켜줄 뿐만 아니라 사용 하중 상태에서 처짐과 균열의 크기를 감소시켜 콘크리트 부재의 내구성을 향상시킨다.

* Corresponding author
Tel : 064-754-3456 Fax : 064-725-2519
E-mail : sypark@cheju.ac.kr

탄소 FRP(CFRP) 슈트나 판은 부착공법의 적용에 있어서 강판을 대체할 수 있는 가장 큰 잠재력을 지닌 재료로 믿어진다. 탄소 FRP(CFRP) 재료는 높은 인장강도와 강성을 지니고 있으며 피로 저항성도 어느 FRP 재료보다 높다. 더군다나 CFRP 재료는 콘크리트 구조물에 일어날 수 있는 실제적인 모든 종류의 환경적인 요인에 대한 내구성을 지니고 있다^{2,4)}. 특히 CFRP 판은 보강량이 많은 경우 여러 장의 CFRP 슈트를 붙이는 번거로움과 비교적 다루기 쉬운 시멘트 모르타르와 같은 epoxy resin을 사용함으로써 시공성이 우수하다.

본 연구는 CFRP 판의 부착길이와 CFRP 슈트의 복부 정착 길이가 휨 보강효과와 거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 보강량에 따른 휨 보강효과에 대한 연구로는 참고문헌^{3,6,7,8)} 등이 있다.

2. 실험계획

2.1 시험체 내용 및 변수

재하시험을 위한 하중배치와 보의 치수 그리고 각종 게이지 위치는 Fig. 1과 같다. 시험체는 콘크리트 구조설계 기준⁵⁾에 따라 휨에 대해서는 SD30 D16 철근 2개를 배근하여 최대 철근비의 76%를 사용하였으며 압축철근으로는 SD30 D10 철근 2개를 사용하였다. 전단철근으로는 SD30 D10 스테리프를 100 mm 간격으로 배근하여 충분한 전단저항능력을 가짐으로써 발생할지도 모를 전단파괴를 방지하여 휨 보강효과에 대해서만 조사할 수 있도록 하였다.

시험변수로는 CFRP 판의 휨 부착길이와 CFRP 슈트의 복부정착 길이를 선택하여 휨 보강효과에 미치는 영향을 조사하였다. 총 8개의 시험체를 시험하였는데 그 중 하나는 아무런 보강도 하지 않은 기준 시험체로서 다른 보들과 비교될 수 있도록 계획하였다. 휨 부착길이와 관련한 FRP 판의 길이로는 전지간 부착과 전지간의 2/3 부착을 사용하였다. 복부정착의 정도는 전 길이 휨 부착의 경우 부착길이의 2/6, 4/6, 6/6, 즉, 전단지간의 1/2, 2/2, 전단지간과 중앙부를 CFRP 슈트로 섬유방향이 보의 길이방향과

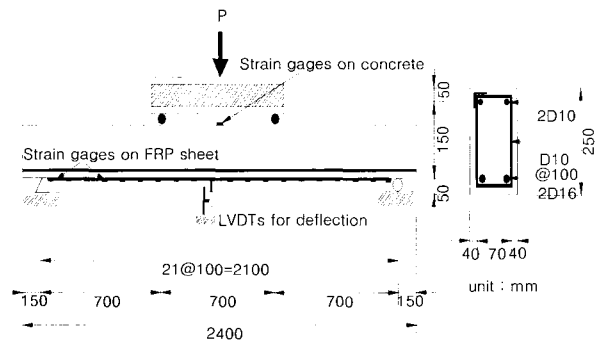


Fig. 1 Test beam set-up, dimensions, and gages

직각되게 복부에 감싸 정착하였고 전지간의 2/3 길이를 휨 부착한 경우 부착길이의 2/4, 4/4를 복부에 정착하였다. 시험변수에 대한 그림은 Fig. 2에 나타내었고 자세한 시험변수 및 시험보 상세는 Table 1과 같다.

2.2 재료

2.2.1 콘크리트

시험체는 레미콘(redady-mixed concrete)을 사용하였는데 시멘트 종류는 제1종을, 잔골재는 자연모래를, 굵은골재는 최대 크기 25 mm의 쇄석 골재를 사용하였다. 목표 설계강도는 210 kgf/cm² (20.6 MPa)였으며 공시체는 시험체와 같은 조건, 즉 7일간 습윤양생 후 온도 약 20 °C, 습도 약 50%의 실내에서 양생하였다. 시험체 실험 시점의 5개의 공시체 압축강도 시험결과는 평균 233 kgf/cm²를 나타내었다.

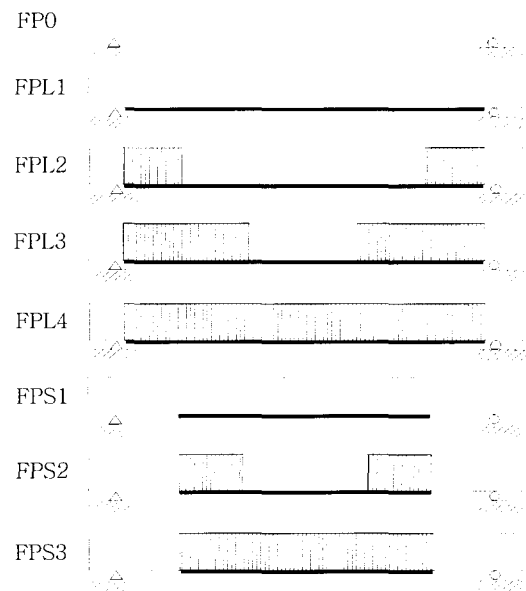


Fig. 2 Experimental test parameters

Table 1 Details and parameters of test beams

Beam	Plate width w(mm)	Plate bond length l_b (mm)	Sheet web anchorage length L_d (mm)	Reinforcing steel
FP0	0	0	0	Longitudinal 2D16 (3.97 cm ²) $\rho=1.31\%$
FPL1	100	650+700+650	0	
FPL2	100	650+700+650	325*2sides	
FPL3	100	650+700+650	650*2sides	
FPL4	100	650+700+650	1,000*2sides	Stirrup 2D10 (1.43 cm ²) @100 mm $\rho_v=0.95\%$
FPS1	100	350+700+350	0	
FPS2	100	350+700+350	350*2sides	
FPS3	100	350+700+350	700*2sides	

2.2.2 철근

보 시험체 제작에 사용된 철근은 탄성계수가 2.0×10^6 kgf/cm²인 SD30 종류로 주철근 용으로 D16을, 압축철근과 스티럽 용으로는 D10을 사용하였다. 인장시험 결과 D16 철근의 평균 항복응력은 3,826 kgf/cm²를 나타내었고 D10 철근은 평균 항복응력 3,502 kgf/cm²를 나타내었다.

2.2.3 탄소 FRP 판

본 시험에서 휨 보강용으로 사용된 CFRP 판은 두께 1.29 mm, 폭 50 mm인 Sika사의 제품, CarboDur를 사용하였다. 인장시험 결과 탄소섬유보강 폴리머 판의 인장강도는 3,620 kgf/cm(28,066 kgf/cm²)이며 탄성계수는 235,346 kgf/cm(1.824×10⁶ kgf/cm²)이고 최대 변형률은 1.54%였다. 접착제로 사용된 에폭시는 프라이머 없이 모든 사용 환경에 사용하는 Sikadur 30을 사용하였다. 한편, 복부 정착용으로 사용된 CFRP 슈트는 접착종이 위에 섬유를 일 방향으로 배열시켜 만든 것으로 일본 Tonen사의 제품, Forca Tow Sheet를 사용하였다. 인장시험결과 CFRP 슈트의 인장강도는 347 kgf/cm(31,576 kgf/cm²)이며 탄성계수는 39,910 kgf/cm(3.628×10⁶ kgf/cm²)이고 최대 변형률은 0.87%이다. 슈트 접착제로 사용된 에폭시는 보통 표준환경용을 사용하였다.

2.3 CFRP 부착

2.3.1 콘크리트 표면처리

부착할 콘크리트 표면처리를 위해 디스크 그라인딩 방법을 채택하였다. 콘크리트 표면은 레이탄스를 완전히 제거하고 굵은 골재의 조직이 충분히 나타날 정도로 갈아내었으며 거꾸집 표시나 돌기가 1.0 mm 이상이 되지 않도록 처리하였다. 콘크리트 표면은 갈기 후 솔과 진공청소기를 이용하여 먼지들을 완전히 제거하였다. 휨 보강을 위하여 CFRP 판을 보 하면에 부착후 CFRP 슈트의 부착효과를 증대시키기 위해 제조사에서 제공된 프라이머를 슈트 접착 하루 전에 복부 콘크리트 조직내로 충분히 스며들 수 있도록 도포 하였다.

2.3.2 CFRP 접착

CFRP 판은 필요한 길이만큼 전기 절삭기로 자르고 깨끗한 형접으로 판에 묻어 있을 수도 있는 탄소가루나 먼지 등을 제거하였다. 접착제는 제조사의 기술자료에 따라 레진과 경화제를 혼합하여 충분히 섞일 수 있도록 저어주었다. 에폭시 접착 모르타르는 작은 흡손으로 콘크리트 표면과 CFRP 판에 일정한 두께로 바른 후 맞붙여 고무 롤러를 사용하여 압착함으로써 일정한 두께(약 2 mm)가 될 수 있도록 하였다. 복부 정착을 위한 CFRP 슈트는 접착제가 탄소섬유사이로 충분히 스며들 수 있도록 압착하여 탄소섬유가 에폭시 접착제와 일체로 작용되도록 하였다.

2.4 하중재하와 데이터 수집

하중은 4점 재하법으로 지간의 1/3 지점 두 곳에 하중이 작용될 수 있도록 강재보를 설치하고 가력 프레임에서 유압 하중기를 사용하여 파괴시까지 재하 하였다. 하중은 변위 조절방법으로 분당 약 1.5 mm의 속도로 재하 하였으며 재하하중 약 2 tonf 마다 균열을 표시하고 사진을 촬영하였다. 데이터 수집은 동적변형기를 사용하고 컴퓨터 자동 데이터 수집 프로그램을 이용하여 작용하중, 처짐, 철근과 콘크리트, CFRP 판의 변형률을 측정하였다. 처짐, 변형률의 측정위치는 Fig. 1에 나타나 있다.

3. 실험결과와 분석

3.1 파괴형태와 거동

파괴형태는 휨 인장균열과 전단균열의 발생과 진전, 휨 부착한 CFRP 판의 부착파괴 여부, 복부 정착한 CFRP 슈트의 파단이나 탈락여부, 압축부 콘크리트 파괴의 발생과 진전, 변형률 게이지로 부터의 FRP 판과 콘크리트 변형률 곡선, 하중-처짐 곡선 등을 면밀히 검토하여 파괴과정과 최종 파괴형태를 결정하였다. Table 2에서는 각 시험체의 파괴과정과 최종 파괴형태를 정리하였고 Table 3은 각 시험체의 최대 하중, 최대하중 시 처짐과 변형도(deformability)

Table 2 Failure mode and process of test beams

Beam	Failure process	Failure mode
FP0	Steel yielding→crushing of top concrete	Tension failure
FPL1	Steel yielding→ripping off of concrete cover→delamination of FRP plate	Ripping off of concrete cover
FPL2	Steel yielding→debonding of CFRP plate→tearing of FRP sheet	Debonding of FRP plate
FPL3	Steel yielding→debonding of CFRP plate→tearing of FRP sheet	Debonding of FRP plate
FPL4	Steel yielding→debonding of CFRP plate→tearing of FRP sheet	Debonding of FRP plate
FPS1	Steel yielding→ripping off of concrete cover→delamination of FRP plate	Ripping off of concrete cover
FPS2	Steel yielding→debonding of CFRP plate→tearing of FRP sheet	Debonding of FRP plate
FPS3	Steel yielding→debonding of CFRP plate→tearing of FRP sheet	Debonding of FRP plate

Table 3 Ultimate load, deflection, and deformability

Test beam	At maximum load		Deflection ratio
	Load, tonf	Deflection, mm	
FPO	7.443	9.416	1.000
FPL1	11.577	12.570	1.335
FPL2	14.486	16.910	1.796
FPL3	16.829	20.392	2.166
FPL4	17.629	22.635	2.404
FPS1	8.841	9.947	1.056
FPS2	12.200	12.909	1.371
FPS3	12.808	13.317	1.414

를 기준 시험보(FPO)의 항복시 처짐값($\delta_y=9.416$ mm)과 시험보 들의 최대 하중 시 처짐값(δ_{max})과의 비로 나타내었다.

Fig. 3은 CFRP 판을 전 지간, 즉, 전 전단지간에 휨 부착한 보의 하중-처짐 곡선을 나타내고 있다. 하중-처짐도에 나타난 바와 같이 아무런 보강도 하지 않은 기준보는 철근 항복 후 계속 처짐이 증가하다 결국에는 콘크리트 압축부분이 파괴되는 전형적인 휨 인장파괴를 보여주었다. 그러나 CFRP 판으로 전지간에 걸쳐 휨 보강하고 복부정착이 없는 시험보 FPL1은 철근항복과 함께 FRP 판 끝에서 발생한 전단균열이 FRP 판의 인장력에 의하여 그 경사를 낮추며 콘크리트 인장저항력이 약한 주철근을 따라 전진하며 콘크리트 덮개가 아래 방향으로 회전함으로써 CFRP 판이 탈락하기 시작하며 최대 하중저항력을 상실하였다. 그러나 최대하중 상실 후에도 시험보 FPL1은 보강하지 않은 보 FPO 보다는 높은 하중 지지력을 가지며 상당한 처짐이 발생할 때까지 저항하였다. Fig. 4는 시험보 FPL1의 콘크리트 덮개균열과 이에 따른 CFRP 판의 탈락에 의한 콘크리트 덮개 박리파괴 형태를 보여주고 있다.

전지간에 휨 보강한 FRP 판을 FRP 슈트로 복부에 정착한 시험보 FPL2, FPL3, FPL4는 철근항복 후 곡선적으로 하중이 증가하다 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 파괴되며 최대하중을 상실하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착한 FRP 슈트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 증가되다 복부 정착한 FRP 슈트가 보 단면 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었다. 따라서 FRP 슈트로 복부정착을 한 보의 경우 툽날 같은 하중-처짐도를 나타내었다. Table 3과 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 복부정착을 실시한 보의 경우 그렇지 않은 보에 비하여 높은 극한하중과 큰 변형을 나타내었다. Fig. 5는 시험보 FPL3의 콘크리트 경계면 부착파괴와 CFRP 슈트 파단파괴에 의한 경계면 전단 박리파괴 형태를 보여주고 있다.

Fig. 6은 CFRP 판을 지간의 2/3, 즉, 전단지간의 1/2에 휨 부착한 보의 하중-처짐 곡선을 나타내고 있다. 복부정

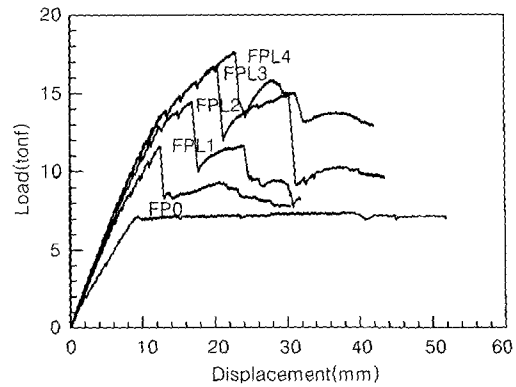


Fig. 3 Load-deflection curves ($L_b=2,000$ mm)

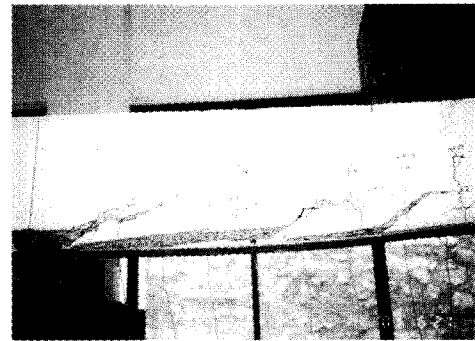


Fig. 4 Concrete cover failure of Beam FPL1

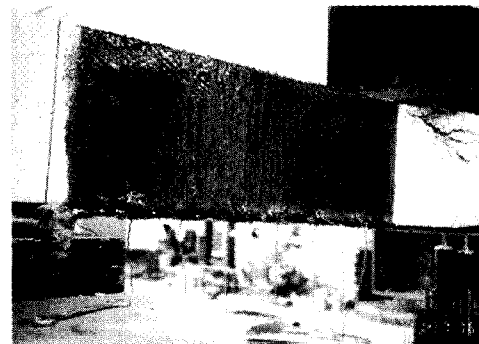


Fig. 5 Delamination shear failure of Beam FPL3

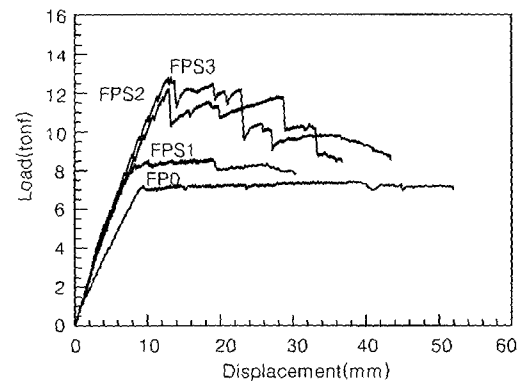


Fig. 6 Load-deflection curves ($L_b=1,400$ mm)

착이 없는 시험보 FPS1은 전지간에 휨 부착한 시험보 FPL1과 마찬가지로 FRP 판 끝에서 발생한 균열이 FRP 판의 인장력에 의하여 주철근을 따라 진전하며 콘크리트 덮개가 벗겨지다 탈락함으로써 최대 하중저항력을 상실하였다. 그러나 주철근을 따라 균열이 진전되는 동안 최대 하중을 크게 상실하지 않고 보강하지 않은 보 FPO 보다 높은 하중 지지력을 가지며 상당한 처짐이 발생할 때까지 저항하였다. 따라서 최종파괴 형태도 콘크리트 덮개 탈락과 이에 따른 CFRP 판의 탈락으로 발생한 콘크리트 덮개 박리파괴로서 전지간에 휨 보강한 시험보 FPL1과 같은 파괴형태를 나타내었다.

시간의 2/3에 휨 보강한 FRP 판을 FRP 슈트로 복부에 정착한 시험보 FPS2, FPS3는 전지간에 휨 부착한 시험보 FPL2, FPL3, FPL4와 마찬가지로 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 파괴되며 최대하중을 상실하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착한 FRP 슈트의 정착 효과에 의해 다시 하중 저항력이 증가되다 복부 정착한 FRP 슈트가 보 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었다. 따라서 FRP 슈트에 의한 복부정착을 가진 보의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다. 또한 복부정착을 실시한 시험보 FPS2, FPS3의 경우 그렇지 않은 시험보 FPS1에 비하여 높은 극한하중과 큰 처짐을 나타내었다.

3.2 실험인자 해석

CFRP 판으로 보강한 RC 보에 있어서 FRP 슈트에 의한 복부정착의 효과는 최대 극한하중과 극한 처짐값을 상당히 증가시켰다. 전지간에 걸쳐 휨 보강한 보들의 경우 시험보 FPL2는 최대극한 하중값에 있어서 FPL1에 비하여 25%, FPL3는 45%, FPL4는 52% 높은 값을 보여주었다. 또한 최대 극한하중 시 처짐량에 있어서는 시험보 FPL2는 FPL1에 비하여 35%, FPL3는 62%, FPL4는 80% 큰 값을 보여주었다. Fig. 7과 8은 전 지간에 있어서 휨 보강한 시험보 들에 있어서 최대 극한하중과 극한처짐 값들이 복부정착 길이에 따라 선형적으로 증가되는 것을 보여주고 있다.

그러나 휨 보강된 CFRP 판 전 길이에 대하여 CFRP 슈트로 복부 정착한 시험보 FPL4와 FPS3이 각각 전단지간에만 복부 정착한 시험보 FPL3과 FPS2에 비하여 완전히 선형적으로 증가되지 못하고 조금 높은 극한하중 지지력을 갖는 것은 휨 모멘트가 일정한 중앙부에 대한 복부정착은 휨 부착에 대한 복부정착의 효과가 적거나 없기 때문으로 판단된다.

시간 2/3만 CFRP 판으로 휨 보강한 보들의 경우 복부정착 효과를 살펴보면 시험보 FPS2는 최대 극한하중에 있어서 FPS1에 비하여 38%, FPS3는 45% 높은 값을 보여주었다. 또한 최대하중 시 처짐량에 있어서 시험보

FPS2는 FPS1에 비하여 30%, FPS3는 34% 큰 값을 보여주었다. Fig. 7과 8은 시간 2/3에 휨 보강한 보들도 전지간에 휨 보강한 시험보들과 마찬가지로 복부정착의 효과로서 최대 극한하중과 극한처짐 값들이 복부정착 길이에 따라 선형적으로 증가되는 것을 보여주고 있다.

Fig. 9와 10은 휨 부착길이에 따라 비슷한 복부정착 형태를 갖는 보들의 보강효과를 비교하고 있다. Fig. 9와 10에서 보는 바와 같이 전지간을 휨 보강한 시험 보들은 시간 2/3를 보강한 보들에 비하여 높은 극한하중과 극한처짐 값을 가짐을 알 수 있다. FRP 슈트에 의한 복부정착이 없는 경우 FPL1은 FPS1에 비하여 31%, 전단지간의 일부 혹은 전부를 복부 정착한 시험보 FPL2와 FPL3는 FPS2

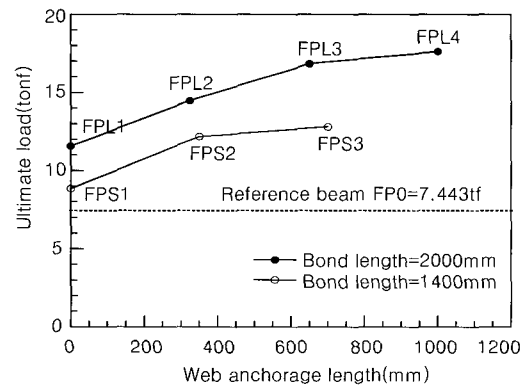


Fig. 7 Effect of web anchorage on ultimate load

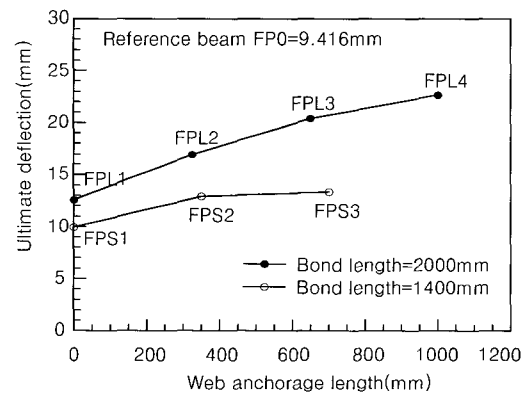


Fig. 8 Effect of web anchorage on ultimate deflection

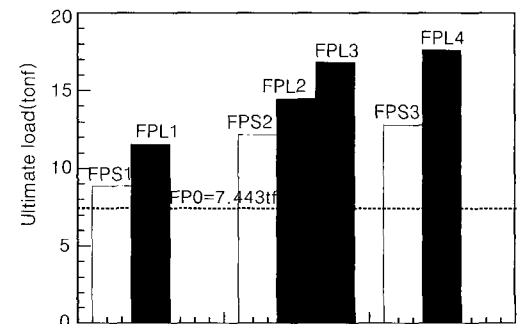


Fig. 9 Effect of bond length on ultimate load

에 비하여 각각 19%, 38%, 휨 보강한 부분을 전부 복부 정착한 보 FPL4는 FPS3 보다 38% 높은 극한 하중 지지력을 나타내었다.

한편 최대하중시의 변형도를 휨 부착길이에 따라 비교하여 보면 FRP 슈트에 의한 복부정착이 없는 경우 FPL1은 FPS1에 비하여 26%, 전단지간의 일부 혹은 전부를 복부정착한 시험보 FPL2와 FPL3은 FPS2에 비하여 각각 25%, 58% 높은 값을 가지며 휨 보강한 부분을 전부 복부 정착한 시험보 FPL4는 FPS3 보다 70% 높은 값을 나타내었다.

Fig. 11과 12는 복부정착이 없는 시험보 FPL1과 복부정착이 있는 시험보 FPL3의 하중 증가에 따른 CFRP 판의 변형률을 보 전 길이에 걸쳐 나타낸 것으로 변형률 선도의 모양은 휨 모멘트도의 모양과 개략 일치하고 있으며 전단지간 사이의 변형률의 변화는 개략 직선적인 분포를 보인다. 따라서 콘크리트 계면 전단파괴의 경우 일정한 전단응력가정 하에 순수 콘크리트 전단저항강도와 복부정착 FRP 슈트의 전단저항강도의 합인 겉보기 콘크리트의 평균 극한전단강도를 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\tau_u = \frac{T_{FRP}}{wl_b} \quad (1)$$

여기서, T_{FRP} 는 CFRP 판의 최대 인장력이며 w 는 FRP 판의 폭이고 l_b 는 하중 재하점으로부터 지지점까지의 부착길이이다. FRP 판의 최대 극한인장력은 아래와 같이 해석적인 방법으로 계산할 수 있다.

$$T_{FRP} = 0.85f_{ck}ba + C_s - T_s \quad (2)$$

$$a = (T_s + T_{FRP} - C_s) / (0.85f_{ck}b) \quad (3)$$

$$T_{FRP} = \left(M_u - (T_s - C_s)(d - \frac{a}{2}) - C_s(d - d') \right) / \left(h - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

여기서, b 는 보의 너비, a 는 등가 직사각형 압축응력 블록의 깊이, d 는 유효깊이, d' 는 압축철근의 깊이, h 는 단면높이이다. 또한 T_s 는 인장철근의 인장력, C_s 는 압축철근의 압축력, T_{FRP} 는 FRP 판의 인장력이며 M_u 는 보 강된 보의 극한 모멘트이다.

그런데 경계면에서의 극한전단강도 τ_u 는 콘크리트에 의한 극한 전단강도와 복부 정착한 FRP 슈트의 극한 전단강도와의 합이므로 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$\tau_u = \tau_{Cu} + \tau_{Fu} \quad (5)$$

여기서, τ_{Cu} 는 순수 콘크리트만에 의한 극한 전단강도이며 τ_{Fu} 는 복부 정착한 FRP 슈트에 의한 극한 전단강도이다. τ_{Fu} 는 복부정착 슈트가 보 하면 양 모서리에서 저항해 주는 강도이므로 단위길이당 전단강도 v_{Fu} 로 환산하면 다음과 같다.

$$v_{Fu} = \frac{\tau_{Fu}wl_b}{2l_{wa}} = \frac{T_{FRP} - \tau_{Cu}wl_b}{2l_{wa}} \quad (6)$$

여기서, l_{wa} 는 복부 정착한 FRP 슈트의 길이로 시험보 FPL4와 FPS3의 경우 전단지간 사이의 길이만 고려하였다.

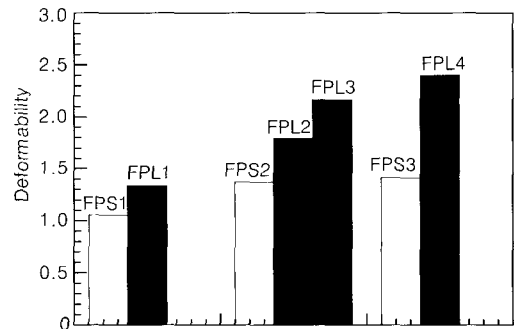


Fig. 10 Effect of bond length on ductility

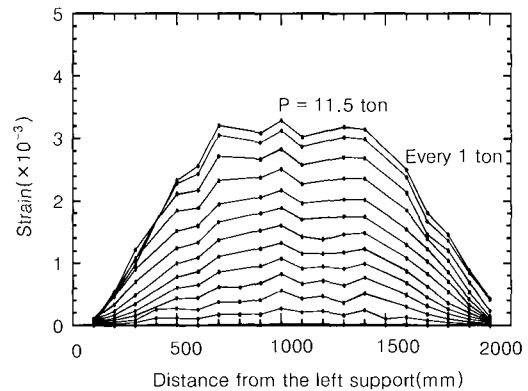


Fig. 11 FRP plate strain curves along Beam FPL1

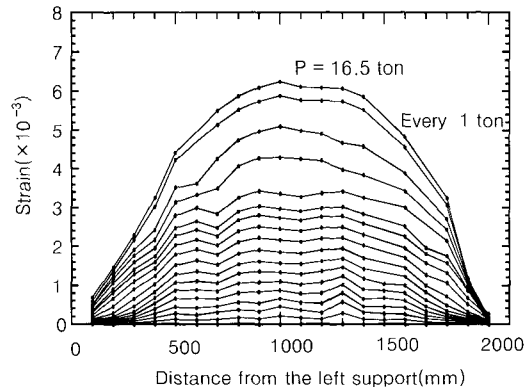


Fig. 12 FRP plate strain curves along Beam FPL3

Table 4에서는 FRP 판의 인장력과 평균 극한전단강도, FRP 슈트의 단위길이당 극한 전단강도를 계산하였으며 콘크리트에 의한 극한전단강도는 복부정착이 없는 시험보 FPL1과 FPS1을 기준으로 삼았다.

이론식 (1)~(6)으로 구한 값들을 정리한 Table 4에서 보는 바와 같이 전지간에 걸쳐 CFRP 판으로 휨 보강하고 복부정착이 없는 시험보 FPL1과 FPS1의 경우 콘크리트 덮개 박리파괴 시 콘크리트의 이론 극한 전단강도 10.343 kgf/cm², 6.629 kgf/cm²는 각각 $0.68\sqrt{f_{ck}}$, $0.43\sqrt{f_{ck}}$ 정도이고, 전단지간에 CFRP 슈트로 복부 정착하여 경계면 전단파괴를 보인 시험보 FPL2와 FPS3의 이론값 24.900 kgf/cm², 25.166 kgf/cm²는 각각 $1.63\sqrt{f_{ck}}$, $1.65\sqrt{f_{ck}}$ 정도이다. 한편 복부 정착한 FRP 슈트에 의한 전단강도는 (73~93) kgf/cm² 정도의 값들을 보여주었는데, 순수 콘크리트만의 전단강도는 복부정착이 없는 시험보 FPL1과 FPS1의 값 10.343, 6.629 kgf/cm²을 기준으로 계산하였다.

Table 5에서는 이론적으로 구한 FRP 판의 인장력과 변형률을 실험값들과 비교하였다. 복부정착이 없는 시험보 FPL1과 FPS1의 경우 실제 수평 극한 전단강도는 각각 $0.79\sqrt{f_{ck}}$, $0.60\sqrt{f_{ck}}$ 정도이고, 복부정착한 시험보 FPL2와 FPS3의 실험값은 각각 $1.65\sqrt{f_{ck}}$, $1.49\sqrt{f_{ck}}$ 정도이다. 또한 FRP 슈트가 부담한 실제 전단강도는 단위 길이당 (53~69) kgf/cm의 값들을 보여주었다.

여기서 복부정착이 없는 보의 경우 파괴형태가 달라 복부정착이 있는 보의 경계면 콘크리트의 수평 전단강도와 직접 비교할 수 없으나 복부정착이 없는 보의 덮개파괴 전까지 경계면 콘크리트의 전단 박리파괴가 발생하지 않았으므로 콘크리트의 실제 수평 전단강도 $(0.60 \sim 0.79)\sqrt{f_{ck}}$ 값은 하한값의 범위로 볼 수 있으며 FRP 슈트로 복부정착한 경우의 실제 전단강도 $(1.49 \sim 1.65)\sqrt{f_{ck}}$ 은 상한값의 범위로 볼 수 있다.

Table 4 Expected average ultimate shear stress

Beam	P _u (tonf)	M _u (tf*m)	a (cm)	T _{FRP} (kgf)	τ_u (kgf/cm ²)	v_{Fu} (kgf/cm)
FPO	7.443	2.605	3.43	-	-	-
FPL1	11.577	4.052	5.70	6,723	10.343	0
FPL2	14.486	5.070	7.40	11,771	18.109	77.66
FPL3	16.829	5.890	8.88	16,185	24.900	72.78
FPL4	17.629	6.170	9.42	17,779	27.352	85.05
FPS1	8.841	3.094	4.21	2,320	6.629	0
FPS2	12.200	4.270	6.05	7,768	22.194	77.83
FPS3	12.808	4.483	6.40	8,808	25.166	92.69

Table 5 Tensile strength and strain of FRP plate

Beam	Expected		Tested		Tested/ Expected
	T _{FRP} (kgf)	Strain ϵ ($\times 10^{-3}$)	Strain ϵ ($\times 10^{-3}$)	T _{FRP} (kgf)	
FPL1	6,723	2.857	3.322	7,817	1.16
FPL2	11,771	5.002	5.051	11,886	1.01
FPL3	16,185	6.877	6.933	16,317	1.01
FPL4	17,779	7.555	7.123	16,762	0.94
FPS1	2,320	0.986	1.371	3,226	1.39
FPS2	7,768	3.301	2.933	6,902	0.89
FPS3	8,808	3.743	3.338	7,855	0.89

4. 결 론

CFRP 판으로 휨 보강한 철근콘크리트 보에 있어서 FRP 판의 휨 부착길이나 CFRP 슈트에 의한 복부정착 길이에 따른 거동과 보강효과에 대한 실험연구로부터 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있다.

1) CFRP 판을 이용한 외부 부착공법은 일반적으로 보통의 철근비를 가진 철근 콘크리트 보의 경우 휨 저항강도를 상당히 증가시킬 수 있다.

2) CFRP 판으로 휨 보강한 보는 복부정착이 없는 경우 콘크리트 덮개 박리파괴를 나타내고, CFRP 슈트로 CFRP 판을 복부 정착한 보의 콘크리트 계면 전단 박리파괴를 나타낸다.

3) 보강 FRP 판의 휨 부착길이는 길수록 극한하중 지지력과 극한 처짐량을 증가시킨다. 그러므로 가급적 휨 부착은 지지점까지 연장해 주는 것이 좋다.

4) FRP 슈트에 의한 휨 보강 FRP 판의 복부정착은 극한하중 지지력과 극한 처짐량을 매우 증가시키며 그 효과는 복부정착길이에 따라 증가한다. 특히, 극한하중 도달 후에도 파괴시까지 높은 변형도를 유지한다.

5) FRP 슈트에 의한 휨 보강 FRP 판의 복부정착이 극한하중과 극한 처짐량을 증가시키는 것은 콘크리트 덮개의 박리파괴를 방지하고 슈트의 섬유 직각방향의 전단 저항력이 보 모서리에서 발생하기 때문으로 판단된다.

6) 하중재하 시 FRP 판에 발생하는 변형률은 휨 모멘트 도의 모양과 거의 일치한다. 따라서 전단지간에서 경계면 콘크리트에 발생하는 전단 저항응력이 일정하다는 가정을 세울 수 있다.

참고문헌

1. ACI Committee 440, "State-of-the-art Report

on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Concrete," American Concrete Institute, 1996.

2. Plevis, N. and Triantafillou T. C., "Time Dependant Behavior of RC Members Strengthened with FRP Laminates," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 3, 1994, pp.1016~1042.
3. Park, S. Y., Park, J. W., and Min, C. S., "Strengthening Effect of R/C Beams with Different Strengthening Level," *KCI Concrete Journal*, Vol. 12, No.1, 2000, pp.113~120.
4. Meier, U. and Winistorfer A., "Retrofitting of Structures through External Bonding of CFRP

Sheets," *Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, RILEM Proceedings 29, Taerwe L., Editor, E & FN Spon, 1995, pp.465~472.

5. 콘크리트 구조 설계 기준, 건설교통부, 1999.
6. 오용복, 권영웅, "탄소섬유쉬트 보강된 철근 콘크리트 보의 보강철근비에 따른 구조적 거동," 콘크리트 학회지, 제10권, 2호, 1998, pp.119~126.
7. 이현호, 구은숙, "아라미드 섬유쉬트로 휨 보강한 RC 보의 강도성능 및 변형성능에 관한 고찰," 콘크리트 학회지, 제10권, 5호, 1998, pp.151~165.
8. 정원용, 이성우, "탄소 및 유리섬유 인발성형 스트립으로 보강된 RC 보의 실험적 거동분석," 대한토목학회 논문집, 제20권, 6-A호, 2000, pp.1039~1048.

요 약

본 논문은 탄소 FRP 판을 이용한 철근 콘크리트 보의 휨 보강효과와 거동에 대한 연구이다. 본 연구에서의 실험인자로는 휨 보강 탄소 FRP 판의 부착길이와 탄소 FRP 쉬트의 복부정착 길이이다. 시험보는 탄소 FRP 판으로 인장면에 부착하여 휨 보강하고 FRP 판을 탄소 FRP 쉬트로 복부에 정착하였다. 일반적으로 복부정착이 없는 휨 보강된 보들의 파괴형태는 횡방향 주철근을 따라 발생한 콘크리트 덮개 박리파괴를 나타내었다. 반면, 탄소 FRP 쉬트로 복부 정착된 휨 보강 보들은 CFRP 파단파괴 후 콘크리트 경계면 전단 박리파괴를 나타내었다. 보강된 보들의 극한하중과 극한처짐은 FRP 판의 휨 부착길이의 증가에 따라 증가하였다. 또한, 휨 보강된 보들은 FRP 쉬트의 복부정착 길이의 증가에 따라 극한하중과 극한처짐 값이 증가하였다. 특히, 복부 정착한 보들은 최대 극한하중에 도달한 후에도 상당한 극한하중 지지능력을 상당한 극한 처짐 시까지 유지하였다. 시험보의 길이에 걸친 FRP 판의 변형률 분포는 휨 모멘트도의 모양과 거의 유사하여 전단지간에서 일정한 전단응력 분포를 가정할 수 있었다. 전지간을 휨 보강한 보에 있어서는 콘크리트와 FRP 쉬트에 의한 경계면에서의 극한전단 저항강도는 복부정착 길이가 늘어남에 따라 증가하였다. 전단 저항강도 중에서 본 실험에서 사용한 복부 정착 FRP 쉬트도 일부의 전단 저항강도를 부담하였다.

핵심용어 : 보강, 탄소 FRP 판, 부착길이, 복부정착, 콘크리트 덮개 파괴, 전단박리파괴