탄소섬유시트를 사용한 철근콘크리트 구조물의 휨 보강에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Flexural Repair of Reinforced Concrete Beams with the CFRP Sheet

박 정 원* 박 상 렬** 민 창 식***
Park, Jeong Won Park, Sang Yeol Min, Chang Shik

ABSTRACT

This paper presents the behavior and strengthening effect of reinforced concrete rectangular beams strengthened using CFRP sheets with different strengthening level. In general, normally strengthened beams are failed by interfacial shear failure (delamination) within concrete, instead of by tensile failure of the CFRP sheets. The delamination occurred suddenly and the concrete cover cracked vertically by flexure was spalled off due to the release energy. The strengthened beams were stiffer than the control beam before and after reinforcement yielding. The ultimate load considerably increased with an increase of strengthening level, while the ultimate deflection significantly decreased. The tensile force of CFRP sheets and average shear stress of concrete at delamination failure were curvilinearly proportional to the strengthening level. Therefore, the increment of ultimate load obtained by strengthening was curvilinearly proportional to the strengthening level.

Keywords; strengthening effect, strengthening level, CFRP sheet, interfacial shear failure, delamination failure, ultimate load, ultimate deflection

1. 서 론

고급복합소재는 오늘날 건설부문에서 중요한 부문을 차지하고 있으며 특히 콘크리트 구조물의 보수, 보강에 있어 중요한 역할을 하고 있다.

복합재료는 비부식, 경량성 그리고 적용길이 등에 제한을 받지 않는다. 복합소재 중 FRP시트와 적층판은 사용중인 교량 구조물의 최대하중능력을 개선시키고 수직처짐을 감소시키는데 사용되어지며 구조물의 균열 폭을 제한하고 균열분포를 개선하는 경향이 있다. 복합소재는 보통 거더의 인장부위에

* 정회원, 동국대 토목공학과, 석사과정
** 정회원, 제주대 해양토목공학과, 교수
*** 정회원, 동국대 토목공학과, 교수

에폭시로 접착되며, 강도와 강성을 증가시킨다. 복합소재를 사용한 보강기술의 발전은 강판접착공법에서 필요로 하는 고정구 등을 필요로 하지 않으며 간단히 적용할 수 있다

CFRP는 첫째 콘크리트 구조물의 외부보강에 적합한 것으로 나타났으며 일반적으로 사용됐던 강판접착공법을 대체할 수 있는 높은 가능성을 제공하고 있고, 과도한 피로거동에도 사용할 수 있는 고강도와 고강성의 특질을 갖고 있다. 둘째 CFRP시트는 콘크리트 구조물에 발생할 수 있는 모든 환경적 요인하에서 그 지속성을 갖고 있다. 본 논문에서는 콘크리트 빔의 휨 보강에 관해 CFRP시트의 적용에 따른 빔의 보강효과를 연구하였다.

2. 실험계획

하중재하와 빔의 단면은 그림 1에 나타내었다.

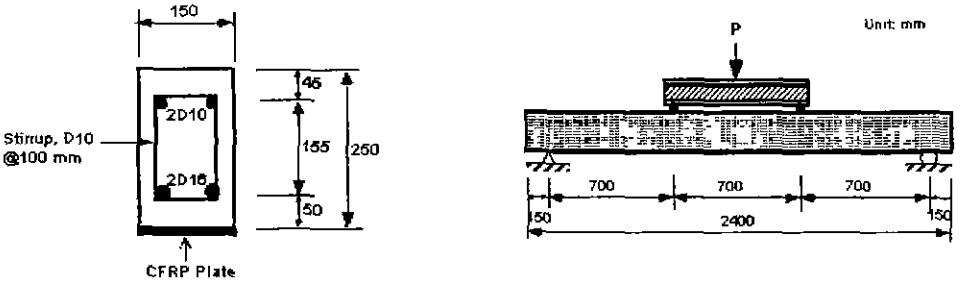

그림 1 실험체의 단면형상 및 하중재하

실험체의 설계는 최대철근비의 약 76%를 갖도록 설계하였으며 휨에 대해서 CFRP시트를 위의 그림에서 보여지는 것처럼 빔의 밑면을 따라 지점과 지점사이에 접착하였다. CFRP시트를 부착하기 전에 보강시스템을 적용하기 위해 균열이 발생한 실제 구조물을 가정하기 위하여 극한설계하중인 4.7t의 60%를 선행 하중으로 가력하였다.

2.1 실험변수

아래 표 2.1에서 표현한 것처럼 CFRP시트의 보강조건을 다르게 하여 보강효과를 조사하는 것을 실험변수로 하였다. 전체 실험체는 무보강 빔과 보강의 조건을 달리한 CFRP부착 실험체와 비교, 실험하였으며 실험체는 인장부에 2개, 압축부에 2개의 철근을 배근하였고 전단철근은 실험체에 발생할 수 있는 가능한 전단파괴를 방지하기 위해 충분히 배근하였다.

표 1 실험변수

실험체명	시트겹수	인장철근	전단철근
CF0	0	2D16 (3.97㎠) $P=0.76\,P_{max}$ ≈1.31%	D10 @100㎜ (1.43㎠) $P_y=0.95$
CF1	1		
CF2	2		
CF3	3		
CF4	4		
CF6	6		

2.2 실험체 준비

2.2.1 콘크리트

실험체는 시방서의 배합설계에 따라 레미콘 제품을 사용하여 제작하였다. 포틀랜드 시멘트, 자연사 그리고 굵은 골재최대치수가 25㎜인 콘크리트를 사용하였다. 콘크리트 설계기준 강도는 210kg/㎠이며 공시체 실험결과 평균 약 180kg/㎠ 정도로 나타났다.

2.2.2. CFRP 시트

실험체의 보강을 위하여 쓰여진 CFRP시트는 제조회사의 규준에 맞는 에폭시접착제를 사용하여 실험체에 부착하였으며 재료의 특징은 표 2에 나타내었다.

표 2. CFRP 시트의 특성

품 번	섬유종류	섬유중량 [g/㎡]	설계두께 [㎜]	인장강도 [kgf/㎠]	인장탄성률 [kgf/㎠]
FTS-C1-20	고강도	200	0.111	35500	2.35×10^6

2.2.3 사용철근

사용된 철근은 인장부의 D16과 압축부의 D10 그리고 전단철근으로 D10을 사용하였으며 사용된 철근의 재료특성은 다음 표 3에 나타내었다.

표 3. 사용철근의 특성

구 분	탄성계수 ($\times10^{-6}$)	항복강도 [kg/㎠]	항복변형률 ($\times10^{-6}$)	인장강도 [kgf/㎠]
D10	2.04	3150	2098	4417
D16	2.04	4324	2220	6092

2.2.4 보강할 실험체의 콘크리트 표면 준비

콘크리트 표면의 열화층을 디스크샌더 등을 사용하여 제거, 연마한 후에 연마분진은 압축공기나 솔을 사용하여 제거한다. 또한 물로 세정할 경우 충분히 건조시키도록 한다. 이후 불균일한 단면은 에폭시수지 몰탈, 폴리머시멘트 몰탈 등으로 복구시켜 일체화하고 단면의 단차는 1㎜ 이내로 마무리한다.

2.2.5 CFRP시트의 부착

CFRP시트는 작업성을 고려하여 적당한 크기로 절단하고 실험체의 부착시공면을 확인한다. 이후 CFRP시트 생산업체의 기술자료에 따라 수지의 주제와 경화제를 소정의 배합비로 혼합한 후 롤러나 붓을 사용하여 시공면에 균일하게 도포한다. 도포 후 시트를 시공면에 충분히 눌러 부착시키고 롤러나 고무주걱 등을 사용하여 수지함침 및 탈포작업을 수행하여 작업을 마감한다.

2.3 실험체 설치

실험을 위한 실험체의 설치는 그림 2에서 보는 것과 같이 4점재하방식을 사용하였다. 실험 시 하중의 증가에 따른 실험체의 변위는 중앙부에 설치된 변위측정계를 사용하였고 하중의 증가는 하중계를 사용하였으며 철근과 CFRP시트의 변형률은 그림에서 보는 바와 같이 실험체의 중앙부와 시트의 일정간격에 변형계를 설치하여 변형률측정기를 통해 데이터를 측정하였다.

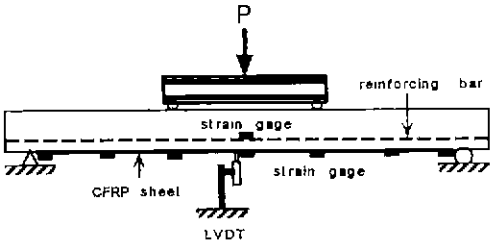

그림 2 실험체 설치

3. 해석 및 실험결과

실험과 관련된 결과는 다음 표 4에 나타내었다.

표 4. 실험결과

실험체	무보강	1겹보강	2겹보강	3겹보강	4겹보강	6겹보강
극한하중 [ton]	9.49	11.36	12.89	13.49	13.62	13.92
극한처짐 [㎜]	27.4	15.5	13.5	12.7	12.0	12.6
파괴형태	휨파괴	보강재 항복	계면박리	rip-off파괴	rip-off파괴	rip-off파괴

3.1 실험체 파괴형태와 거동

실험체의 파괴거동에 있어서 CFRP시트의 1겹 보강인 경우 CFRP시트의 인장항복으로 인한 파괴거동을 나타냈으며 그림 3과 같고, CFRP시트를 2겹에서 6겹까지 보강한 경우 콘크리트표면과 CFRP시트사이에서 전단파괴거동을 나타냈다. 무보강실험체의 경우 철근이 항복한 이후에 실험체의 상부가 압축파괴의 형태를 나타냈으며, CFRP시트를 적용한 보강실험체의 경우 균열의 폭과 균열성장을 감소시키는 개선효과를 보였다. 이 실험결과로부터 CFRP시트의 보강겹수가 적을수록 시트의 항복으로 인한 인장파괴가 나타남을 알 수 있었다. 그림 4에서 보이는 보강실험체인 경우 콘크리트표면과 CFRP시트의 접촉면을 따라 보강재가 탈락하였으며 콘크리트의 전단파괴에 의해 실험체가 파괴되었다. CFRP시트를 부착하기 위해 사용한 에폭시수지는 접착된 실험체의 표면을 박리시켰고, 이 박리는 실험체의 전단과 모멘트구간에서 발생하였다. 보강재인 CFRP시트를 사용하여 보강한 실험체는 선행하중의 가력으로 인해 발생한 균열의 성장을 억제하였다.

그림 3. CFRP시트 1겹

그림 4. CFRP시트 3겹

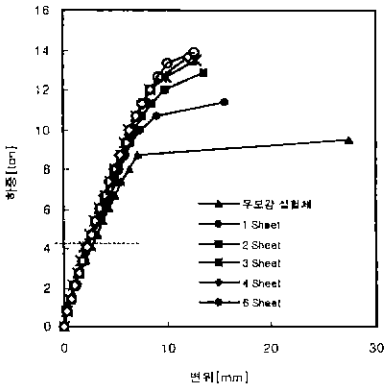

그림 5. 하중-처짐곡선

그림 5는 보강재의 적용을 달리한 각각의 보강실험체와 기준실험체의 하중-처짐 곡선을 비교한 것이다 이 그림을 통해 극한하중은 보강재 적용에 따라 상당히 증가하였으며 극한처짐의 경우에 있어서는 상당한 감소를 보였다. 보강실험체의 경우 철근의 항복 이전과 이후 기준실험체보다 강성이 큰 것으로 나타났으며 사용하중하에서 처짐이 상당히 감소한 것으로 나타났다.

3.2 CFRP시트의 적용에 따른 보강효과

그림 6에서 보이는 바와같이 CFRP시트의 적용량에 따른 극한하중의 증가를 곡선으로 나타내고 있으며 그 기울기는 극한하중-보강관계 곡선으로 표현하고 있다. 이때 CFRP시트의 3겹 또는 4겹인 경우 최대의 보강효과를 나타내는 것으로 실험결과 나타났다. 보강실험체의 극한처짐인 경우 그림 7에서와 같이 보강실험체의 적용에 따른 처짐 감소곡선을 나타내고 있다. 즉 CFRP시트를 사용하여 보강하므로써 낮은 연성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 보강실험체의 CFRP시트가 탈락한 후에도 기준실험체와 비슷한 하중부담능력과 연성을 갖는 것으로 실험결과 나타났다.

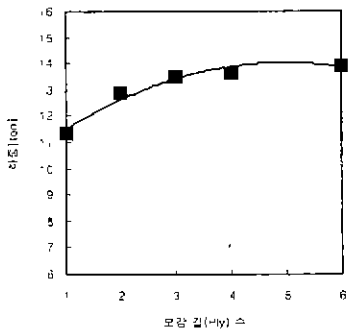

그림 6 보강재별-극한하중 관계곡선

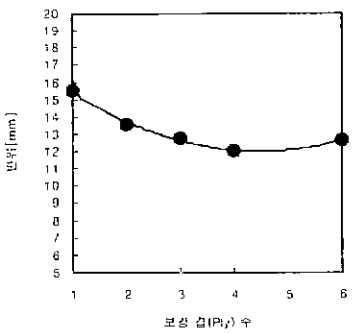

그림 7 보강재별-극한처짐 관계곡선

4. 결 론

본 실험은 CFRP시트를 사용하여 보강한 실험체의 보강효과를 다루었다. 실험의 비교와 분석을 통해 얻은 실험결과는 다음과 같다.

(1) CFRP시트를 사용하여 보강한 실험체는 철근콘크리트보의 극한하중부담능력을 상당히 개선하였다. 본 실험을 통해 얻은 결과로부터 CFRP시트의 적용 겹수는 3겹 혹은 4겹이 적당한 것으로 나타났으며 위의 결과를 확증하기 위해 철근비와 콘크리트의 설계기준강도를 달리하여 실험할 필요가 있다.

(2) 일반적으로 보강실험체의 경우 콘크리트와 CFRP시트의 접착면 사이에서 파괴가 발생한 것으로 나타났으며, 균열의 성장과 분포를 억제하였다

(3) 보강실험체의 경우 기준실험체에 비해 강성이 상당히 큰 것으로 나타났으며 극한처짐의 경우 사용하중하에서 상당히 감소한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R., "RC Beam Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study", Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 11, Nov. 1991, pp. 3417-3433.
2. ACI Committee 440, "State-of-the-art Peport on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", American Concrete Institute, 1996.
3. Saadatmanesh H., "Fiber Composites for New and Existing Structures", ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 3, May-June 1994.
4. Meier, U. and Winisterfer, 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. Naaman, A. E., Park, S. Y., and Lopez, M. M., "Flexural Behavior of RC Beams Strengthened Using CFRP Sheet," University of Michigan, Report No. UMCEE 98-21, August 1998.