

탄소섬유 보강공법의 조기 탈락 방지 공법 개발 연구

Development of New Strengthening Methods Preventing Early Delamination Failure of CFS



한 만 엽*

Han, Man-Yop



백 승 덕**

Baik, Seung-Deok

ABSTRACT

The strengthening method with CFS(Carbon Fiber Sheet) has some fatal defects that the beams strengthened with CFS is always failed far below its ultimated strength due to rapid progress of horizontal delamination. The cracks between beam and CFS are always started from the center of the beam and propagated to the end of the beam. The moment of the beam is always the largest in the middle of the beam, so is the tensile force of the CFS. The bumped surface of the CFS causes debonding force depending on the tensile force of CFS.

In this study, two methods which delay early delamination are suggested and proved its validity, experimentally. The first method is using anchor bolt at the end of CFS, and the second method is using CFS wrap aroud at the center and the end of beam. The maximum load and ductility of the two methods are increased significantly. However, the maximum load is still far below the ultimate load. That's because the tensile strength of CFS is so large that its tensile strength can not be reached under normal loading condition. The ductility of the strengthened beam is improved more than twice before modification.

Keywords : CFS, Strengthening, Delamination, Shear Fixing, Anchor Bolt

* 정희원, 아주대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 아주대학교 토목공학과 석사

·본 논문에 대한 토의를 2000년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

손상된 구조물에 대한 보강공법에는 여러 가지 공법이 있으나, 이 중에서 강판을 이용한 부착식 보강공법과 탄소섬유(CFS)를 이용한 보강공법이 주목을 이루고 있다. 강판 보강공법의 경우에는 극한하중 이후의 설계내하력에 거의 도달한 시점 부근에서 단부에서의 탈락으로 최종파괴가 이루어지는 반면에 탄소섬유를 이용한 부착식 보강공법은 하중이 지속적으로 증가함에 따라 보강재의 중앙부와 모재 사이에서 발생한 수평균열이 단부로 급작스럽게 진전되어 최종적으로는 시험체나 구조물의 중앙부에서의 탈락으로 이어진다는 근본적인 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 탄소섬유가 가지고 있는 근본적인 문제점인 보강재의 조기 탈락을 방지하기 위한 공법을 제시하고, 결과를 실험적으로 검증하고자 한다.

1.1 이론적 배경

탄소섬유에 의한 기존의 보강 공법은 강판과 같이 보강재인 탄소섬유를 보강 실시 지점에 부착하는 것이다. 기존의 탄소섬유를 이용한 보강 공법은 Fig. 1과 같이 하중 재하시 보강 설계 하중에 미치지 못하고 보강재가 조기에 탈락하는 경우가 많았고, 최대모멘트가 발생하는 중앙부의 수평균열이 급속히 단부로 진전되며 최종 파괴에 도달하는 단점이 있다.

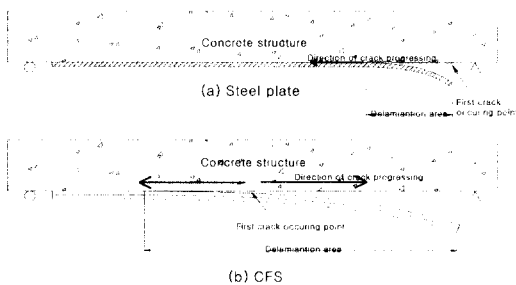


Fig. 1 Debonding and progressing direction of crack

Fig. 2의 (a)에서는 보강재로 강판을 사용한 경우에 하중이 재하됨에 따라 시험체의 단부에서

박리력 T_d 가 발생함을 그림으로서 나타내고 있다. 강판은 그림에 나타낸 바와 같이 탄소섬유와 같은 굴곡이 없기 때문에 인장력은 그대로 단부로 전달되며 단부에서 모재인 콘크리트와 보강재인 강판의 사이에서 변형량의 차이에 의한 전단력이 발생하고 이런 원인에 의하여 단부로부터 수평균열이 시작되어 탈락으로 이어진다. 그러나 탄소섬유가 부착된 경우에 (b)에서는 보강재의 면에 굴곡이 있으므로 보강 후 하중이 작용할 때 탄소섬유에 인장력이 발생하면 그 인장력에 의한 박리력 $T_d/T_a = 2T \sin \theta \propto M$ 가 작용하게되며 이 박리력에 의하여 발생된 수평균열이 단부로 진전되어 최종 파괴에 도달한다. 이 박리력은 탄소섬유 굴곡의 높이 a 와 최대모멘트 발생지점인 보의 중앙부에서 최대이므로 섬유보강부재의 균열발생은 항상 중앙에서 시작한다.

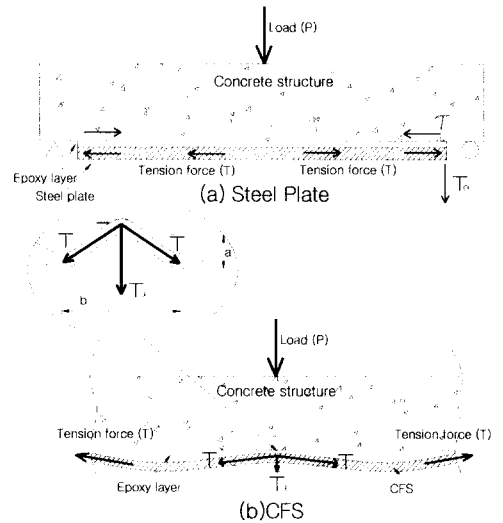


Fig. 2 Delamination force (T_d) when load work

그리고 Fig. 3에는 강판으로 보강된 시험체의 단부에서 강판이 최종 파괴를 일으킨 사진이 도시되어 있고, Fig. 4, Fig. 5에는 탄소섬유를 보강재로 사용한 시험체의 최종파괴형태와 수평균열이 진전되어 가는 과정을 사진으로서 나타내고 있다. 강판보강시험체의 경우 전체 보강재의 약 1/3 지점 이내에서 보강재의 탈락이 발생하여 최종파괴로 이어지는 반면, 탄소섬유 보강 시험체의 경우 최종 파괴시 항상 보강재가 중앙부를 지나

반대편까지 떨어지는 탈락 파괴가 발생하는 차이점이 있다. Fig. 5는 최종파괴에 이르기 직전의 중앙부에 형성된 균열 상태를 보여준다.

본 논문에서는 이러한 탄소섬유를 이용한 부착식 보강공법의 단점들을 수정, 보완하기 위한 방법으로 보강재의 부착 조건을 변화시킨 실험을 통하여 보강 성능의 효과적인 증대를 유도하였다.



Fig. 3 Delamination of steel plate



Fig. 4 Delamination of CFS

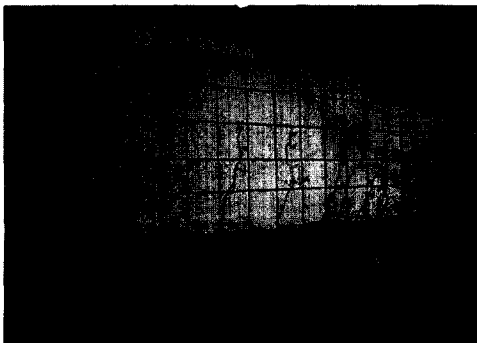


Fig. 5 Crack progressing from center

사진의 시험체명과 논문상의 시험체명이 일치하지 않는 이유는 실험시 임시로 만든 시험체명을 결과 정리시에 그 명칭을 바꿨기 때문이다.

2. 실험

2.1 실험계획

본 실험에서 사용된 시험체의 제원 및 보강재의 물성은 Fig. 6과 Table 1에 제시되어 있다.

철근콘크리트 기준 시험체의 단면치수 및 배근상세는 Fig. 6과 같이 단면 크기는 15×25 cm이고 순지간 길이는 200 cm이고, 콘크리트는 설계기준강도가 210 kgf/cm^2 과 300 kgf/cm^2 인 래미콘을 시험체에 따라 타설하였다.

사용된 철근은 이형철근으로 항복강도가 4000 kgf/cm^2 이며 인장측에서는 2-D13, 압축측에서는 2-D10을 배근하였고 보강재인 탄소섬유는 Table 1과 같은 제품을 사용하였으며, 모든 시험체에 두겹의 탄소섬유를 부착하였다. 부착시 접착성능의 향상을 위해 시험체의 하면을 그라인더로 표면처리 후 프라이머를 도포하였고, 이후에 에폭시 수지로 탄소섬유를 표면에 접착시킨 후 실험의 정확성을 위하여 추가로 일정량의 에폭시를 도포하여 탄소섬유 에폭시 수지 내부까지 완전히 함침 되도록 하였다. 각각의 공법에 대한 실험 진행시에 하중은 중앙에서의 일점재하로 하였으며, 보강재의 탈락이나 파단이 발생할 때까지 일정한 속도로 재하하였다.

실험결과는 실험 진행중 육안으로 관측할 수 있는 최초의 균열이 발생한 균열하중, 항복하중, 처짐등의 요소에 대하여 기존의 보강공법과 비교 분석하였으며, 항복하중이후 최대하중까지의 증가율, 파괴양상, 최종파괴균열양상등에 대하여도 분석을 실시하여 경제성과 신뢰성있는 보강공법을 찾고자 하였다.

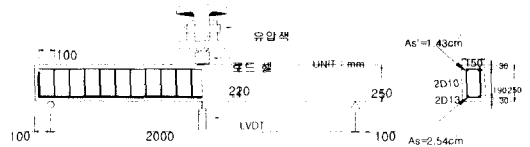


Fig. 6 Configuration of specimen

Table 1 Physical properties of materials

Classification	Strength kgf/cm ²	Young's modulus kgf/cm ²	Dim. (cm)	Remark
R/C beam	Conc.	210	2.17×10^5	End anchor
		300	2.59×10^5	Shear fixing
	Rebar	4.000	2.04×10^6	D10 D13
Carbon Fiber Sheet	35.400	2.36×10^6	$w=10$ $t=0.0167$	Elong. 1.5%

2.2 실험변수

시험체는 기존의 보강공법으로 제작된 1개의 시험체를 기준으로 하여 단부앵커공법을 적용한 시험체 1개, 전단정착공법을 적용한 시험체 3개 총 5개의 시험체에 대하여 실험을 실시하였다.

기존보강공법(CST)은 탄소섬유의 부착길이를 지간의 90% 수준인 180cm로 하였고, 보강폭은 10cm로 하였다. 부착시에는 두께가 0.0167cm인 탄소섬유를 두 겹으로 부착하였다. 단부앵커공법(CEA) 시험체의 제작은 기존의 보강공법으로 제작된 시험체에 추가로 단부에 강판을 예폭시 압착법으로 부착한 후 지름 8mm인 6개의 앵커볼트를 체결하고, 추가로 앵커볼트의 압착력을 최대화하기 위하여 지름 4cm의 와셔를 끼웠다.

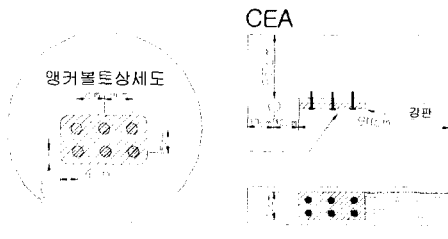


Fig. 7 Detail of end anchor bolt method

전단정착공법은 탄소섬유로서 시험체를 U자형으로 둘러싸는 공법으로서 보강공법 시행시에는 기존의 공법으로 제작된 두 겹의 탄소섬유 위에 추가로 두 겹의 측면보강을 실시하였다. 추가 보강 실시 지점은 그 정착 위치를 단부와 중앙부로

달리 하여 시공하였다. 이에 대한 보강 상세도는 Fig. 8에 도시되어 있고, Table 2에는 위와 같은 단부앵커공법과 전단정착공법의 종류별 시험체의 명칭과 보강방법 등이 요약되어 있다.

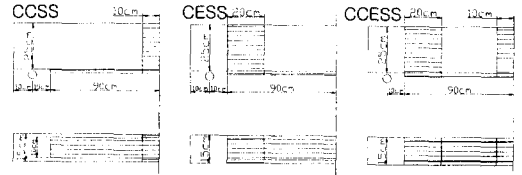


Fig. 8 Details of shear fixing method

Table 2 Test of strengthening beams

Type	Series	Property	Remarks
Control	CST	-	-
End anchor bolt	CEA	End strengthening End anchor bolting	-
Shear fixing	CCSS	Center side bottom	Length of side strengthening : 20 cm
	CESS	End side bottom	
	CCESS	Center + end side bottom	

3. 실험결과

3.1 하중 - 처짐 측정 결과

Fig. 9에는 기존보강공법을 포함한 총 5개의 시험체들에 대한 하중-처짐 측정 결과가 도시되어 있다. 균열하중의 경우에 이론값인 1.349 ton에서 대부분의 시험체가 그래프상의 약간의 강성저하를 보였고, 항복하중의 경우에는 대부분 이론값을 약간 상회하는 수준에서 항복이 일어나 실험에서 획득한 데이터의 신뢰성이 높다고 볼 수 있다. 항복하중 이후의 거동은 탄소섬유의 재료적인 특성상 내부철근의 항복후에도 강성이 큰 탄소섬유가 지속적으로 하중을 받아주어 내하력이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10에는 항복 이후의 거동을 보다 명확히 볼 수 있도록 하중-처짐 그래프를 항복 시점 부근으로 확대하였다.

Table 3 Comparison of experimental and theoretical load and failure mode

Classification	Series	Cracking Load(ton) P_{cr}			Yield Load(ton) P_y			Maximum Load(ton) P_m		Max Def.(cm) δ_{max}	$\frac{P_m - P_y}{P_y}$ (%)	Failure mode
		Theo.	Visual exp.	Defl. (cm)	Theo.	Visual exp.	Defl. (cm)	Visual exp.	Defl. (cm)	Visual exp.		
Control	CST		1.400	0.143		4.613	0.531	6.528	1.603	1.849	41.5	2)
End anchor bolt	CEA		0.800	0.074		4.706	0.657	8.153	4.257	4.427	73.2	2)
Shear fixing	CCSS	1.349	2.000	0.112	4.720	5.133	0.499	7.227	1.342	1.545	40.8	2)
	CESS		1.900	0.113		5.313	0.598	7.400	3.609	4.873	39.3	2)
	CCESS		1.900	0.109		5.106	0.555	7.660	2.202	4.028	50.0	2)

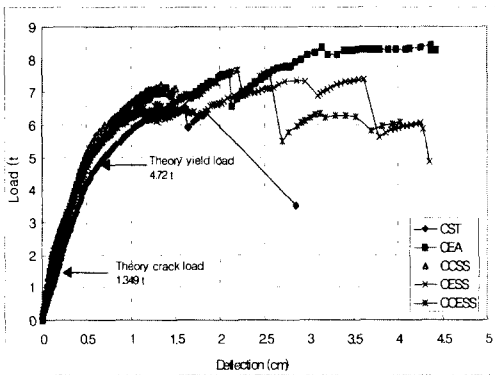


Fig. 9 Test results of load-deflection curves at midspan

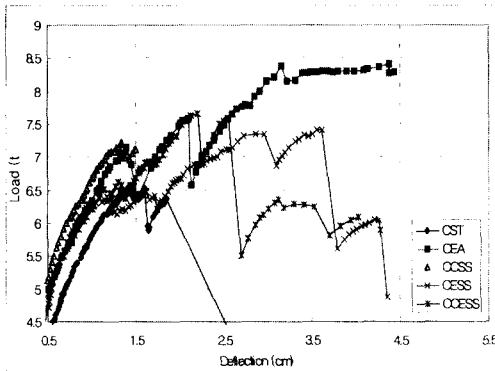


Fig. 10 Enlargement load-deflection curve around yielding

3.2 하중 비교 및 보강재의 파괴 양상

Table 3에는 기존보강공법을 기준으로 본 연구에 적용된 보강공법 별로 균열하중, 항복하중의 이론값과 측정값, 최대하중의 측정값 등을 요약하고 정리하였다.

기존보강시험체(CST)는 균열하중의 경우 이론값과 비슷한 값에서 최초 균열이 관측되었고, 앵커볼트를 적용한 시험체는 0.8 ton에서 최초의 균열이 관측되었으며, 측면을 전단정착한 경우에는 1.9~2.0 ton에서 최초 균열이 관측되었다.

항복하중은 기존보강공법(CST)과 단부앵커공법(CEA)는 이론치와 거의 비슷한 4.800, 4.702 ton에서 항복하는 결과를 보였고, 전단정착공법을 적용한 시험체들은 5.106 ton~5.313 ton 까지 약간 상회하는 값에서 그래프상의 강성의 저하를 보였다. 그러나 최대하중의 측면에서는 단부앵커공법이 8.153 ton으로 가장 우수한 값을 나타냈고, 파괴시의 처짐은 대부분의 시험체가 기존의 보강공법에 비해 약 60%가 증가하여 연성이 크게 증대되었다. 또한 항복하중 이후의 최대하중까지의 증가율면에서는 단부앵커공법이 73.2%로서 가장 큰 증가율을 보였다.

Fig. 11에서는 시험체의 최종 파괴시 보강재의 파괴 양상을 체계적으로 도시한 것으로 참고문헌(3)에 제시되었던 파괴 양상을 수정 보완한 것이다.

의 경우 이론값인 4.72 ton을 약간씩 상회하는 값에서 항복이 일어나는 결과를 보였다. 최대하중은 단부에 앵커볼트를 적용한 시험체(CEA)가 8.153 ton으로 가장 큰 값을 보였고, 파괴시의 처짐은 본 연구에 적용된 공법들이 4 cm 정도의 처짐값을 보여 기존의 보강공법에 비해 연성이 2배 이상 증가하는 결과를 보였다.

- 2) 하중 재하에 따른 보강된 시험체의 파괴양상을 분석하여 그에 따른 파괴 형태를 구분하여 기준표를 제시하였다. 모든 시험체의 파괴양상은 보강재의 중앙부에서 발생한 수평균열이 단부로 급속히 진전되며 중앙부의 탈락으로 이루어지는 CFS의 파괴형태를 보였다. 이는 보강재와 시험체와의 부착이 완벽히 이루어져 일체로 거동을 하였음을 증명하는 것이다.
- 3) 최종균열양상은 시험체 측면의 균열이 전 시간에 걸쳐 골고루 분포하는 형태를 나타내었다.

참고문헌

1. MY Han, KM Lee, JS Sim, "Structural Behavior of RC Beam Strengthened with Notched Steel Plate", Structural Fault and Repair 1999.7. London.

2. 한만엽, 이원창, "구조물의 손상 상태에 따른 보강 설계법 연구", 한국콘크리트학회 논문집 제11권 3호 1999.6.
3. 한만엽, 송병표, 이광명, "노치를 이용한 보강재의 부착력 증가 방안에 관한 연구", 한국콘크리트학회 제11권1호 1999.2., pp.129~139.
4. 아주대학교 토목기술연구소, "탄소섬유 정착공법에 의한 교량보강공법 개발 연구", 1996.
5. 한만엽, 백승덕, "보강재의 부착방법에 따른 물리적 거동 특성에 관한 연구", 1999년도 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp.727~732.
6. T.M Robert and Haji-Kazemi H. "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates", The Structural Engineering, March 1989., pp.39~55.
7. 한만엽, 백승덕, "보강재의 탈락 방지 방안 연구", 1998년도 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, pp.809~814.
8. 한만엽, 이원창, "사용중 보강되는 부재의 보강설계법 연구", 1998년도 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, pp.861~866.
9. 송병표, 한만엽, 황의승, 홍영균, "보수 보강재료의 공법개발연구", 한국콘크리트학회, 1997년도, 봄 학술발표회 논문집, pp.592~597.
10. 심중성의, "철근콘크리트 구조물의 보수보강 신기술 개발", 건설교통부, 1995.10., pp.37~62.

요 약

탄소섬유를 이용하여 손상된 구조물의 보강공법 적용시 기존의 연구 결과와 시공 사례를 보면, 보강재가 하중이 작용하면 중앙부의 보강재와 모재 사이에서 수평균열이 발생하여 보강재가 극한 내하력을 발휘하기 전에 보강재의 분리에 의해 최종적인 파괴가 발생하게 된다는 문제점을 가지고 있다. 시험체와 보강재인 탄소섬유 사이의 수평균열은 항상 시간 중앙에서 시작하여 단부로 진전된다. 모멘트가 최대인 시간의 중앙에서 탄소섬유에 인장력이 발생하게 되고 굴곡을 이루며 부착되어 있는 탄소섬유에 인장력에 의한 박리력이 작용하여 탈락되며 파괴에 이르게 된다.

따라서 본 연구에서는 탄소섬유를 이용한 부착식 보강공법의 단점인 중앙부에서의 보강재의 조기 탈락 파괴를 방지하는 방안을 제시하고, 그 효과를 실험적으로 검증하였다. 첫 번째로 보강재인 탄소섬유의 단부에 앵커볼트를 체결하는 공법을 적용하였고, 두 번째로 탄소섬유를 시험체의 단부와 중앙부의 측면까지 둘러싼 후 정착하여 그 효과를 알아보고자 하였다.

시험 결과 단부에 앵커볼트를 적용한 시험체와 전단정착을 실시한 경우 모두 기존의 보강공법에 비해 최대하중과 연성이 증가하는 결과를 보였다. 그러나 최대하중은 극한하중에 비하여 여전히 낮은데, 이는 보통의 하중 재하 조건에서는 탄소섬유의 재료적 특성상 인장응력이 너무 크기 때문이며, 보강된 시험체의 처짐은 보강전에 비하여 2배 이상 증가하였다.

(접수일자 : 1999. 11. 3.)