

유리섬유강 복합판으로 보강된 RC 보의 파괴 특성

Fracture Characteristics of RC Beams Reinforced with GFSP

김 충 호* 장 희 석** 고 신 웅***
Kim, Chung Ho Jang, Hee Suk Ko, Sin Woong

Abstract

This paper is experimental investigation for failure characteristics and performance of a RC beams strengthened with GFSP which were developed for improvement of the early debonding problems in the externally bonded FRP systems. To represent damages and load conditions of the existing beam, pre-cracks and repeating loads are adopted for experimental parameters. In this experiment, it is confirmed that strengthening with GFSP is a very effective strengthening method for an increase in strength, a decrease in deflection, a control of the crack. But it shown that the design of the beams to be strengthened with GFSP should be consider a brittle behavior of the grass fiber on the flexural capacity.

요 지

이 논문은 FRP시스템 외부부착공법의 조기 탈착문제를 개선하기 위해 개발된 유리섬유강 복합판(GFSP)으로 보강된 RC보의 성능 및 파괴특성에 관한 실험적 연구다. 사용 중인 보의 손상과 재하상황을 실제적으로 모의하기 위하여, 사전균열과 반복하중이 실험변수로 채택되었다. 실험에서 GFSP 보강은 보의 강도증가, 처짐감소, 균열의 억제 등에 매우 효과적인 보강공법임이 확인되었다. 그러나 GFSP로 보강되는 보의 설계는 휨 성능에서 유리섬유의 취성거동을 고려하여야 하는 것을 보여주었다.

Keywords : GFSP(Glass Fiber Steel Plate), Early debonding, Pre-cracks, Repeating loads, Brittle behavior

핵심 용어 : 유리섬유강 복합판, 조기탈착, 사전균열, 반복하중, 취성거동

* 경성대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사

** 부경대학교 건설공학부 교수, 공학박사

*** 경성대학교 토목공학과 대학원 공학석사

E-mail : chkim@ks.ac.kr 016-580-4751

•본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

FRP에 의한 외부부착 보강방법은 경제성, 공기, 보강효과의 직접성 등의 장점으로 시공사례와 연구가 증가하고 있다. 그러나 보강보가 FRP의 파단변형률에 도달하기 전에 모재와의 탈착에 의해 보강성능을 상실하여 파괴되는 것은 널리 알려져 있다. 이러한 파괴형태는 보수 및 보강보의 계산된 강도보다 낮은 값에서 파괴됨을 의미한다.^{(1)~(4)} 따라서, 보수 및 보강보 설계에서 계산되는 강도확보를 위한 FRP의 탈착방지방법으로 유리섬유-강판으로 구성된 복합재료인 GFSP (glass fiber steel plate)를 사용하는 GFSP 앵커공법이 개발되었다. 확실한 부착성능을 갖고 있을 뿐만 아니라 시공이 간편하고 직접적이어서 최근 신기술로서 주목을 받고 있다.⁽⁵⁾ 그러나 이에 대한 연구의 주류는 보강보의 극한하중, 파단시의 변형률, 파괴형태 등을 규명하기 위하여 단조증가 재하실험에 의존하고 있다.⁽⁶⁾ 또한, 보수 및 보강효과를 확인하기 위하여 손상이 없는 실험용 보를 보강하여 실험함으로써 현장의 보수 및 보강상황을 구현하지 못하고 있다. 따라서 이러한 연구방법은 실제의 보가 받고 있는 재하형태와 손상상황을 적절히 모의하지 못하므로 GFSP 보강보의 보강성능과 파괴특성을 규명하는데 한계가 있다.^{(7)~(9)}

이 연구에서는 기존 연구의 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 보강이 필요한 보의 손상모드로서 실험보 항복하중의 75%에 대응하는 변위를 재하하여 사전균열을 발생시키고, 재하속도를 달리하는 반복하중 재하실험을 수행하였다. 이 실험에서 GFSP 부착 보강보의 보강성능, 사전균열의 거동, 파단 시의 모재와의 탈착, 파괴특성 등을 규명하였다.

2. 보강보의 실험

2.1 실험보의 제작 및 재료특성

RC 실험보는 치수 $0.15\text{m} \times 0.25\text{m} \times 2.4\text{m}$ 의 직사각형 복철근 보로 제작되었다. 사인장파괴를 방지하기 위하여 전단력작용 구간은 0.1m, 휨 구간은 0.2m 간

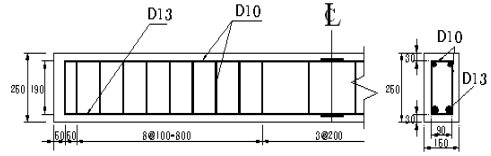


Fig. 1 시험체의 형상

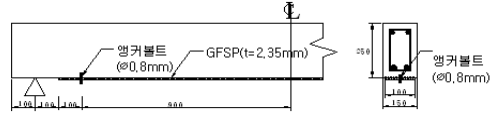


Fig. 2 GFSP 보강보의 형상

격으로 스티럽(D10)을 배치하였다. 철근비(2-D13)는 0.0079이고 구체적인 치수와 형상은 Fig. 1과 같다. 보강보는 보의 하측에 폭 0.15m, 길이 1.8m의 GFSP를 에폭시로 부착하고, 단부에 직경 8mm, 길이 70mm의 스테인리스 앵커볼트로 정착하였다. 보강보의 보강형태는 Fig. 2와 같다. 한편 콘크리트와 철근 및 보강재로 사용된 GFSP와 에폭시의 재료특성은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 실험보의 구성재료 재료특성

구성재료	재료특성		
콘크리트	압축강도	25.63 MPa	
	탄성계수	13.93×10^3 MPa	
철근(D10,13)	항복강도	350 MPa	
	두께	2.35 mm	
GFSP	인장강도	155 (KN/폭 100 mm)	
	인장탄성계수	탄성구간	93,200 MPa
		균열구간	24,800 MPa
에폭시수지 (MT606)	인장강도	47.2 MPa	
	휨강도	65.3 MPa	

2.2 하중가력 및 측정

500 KN 용량의 가력기(MTS)를 사용하여 4점 지지 휨 실험을 변위제어 방식으로 실시하였다. 재하속도(2, 20, 50 mm/min.), 사전균열 유무, 재하형태(단조증가재하, 반복하중재하) 등이 실험변수로 사용되었다. 반복하중 실험의 변위제어는 단조증가 재하실험(STS 보)에서 획득한 항복변위 ($\delta_y = 10$ mm)를 기준으로 하였다.

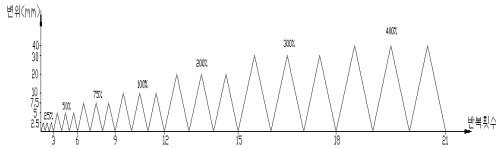


Fig. 3 반복하중 형태

반복하중 재하는 Fig. 3과 같이 항복변위의 25%, 50%, 75%, 100%, 200%, 300%, 400%의 변위를 각각 3회씩 재하하고, 이후에는 20%씩 증가시켜 GFSP의 파단으로 보가 파괴될 때 까지 실험을 계속 하였다.

변형을 측정을 위하여 보 중앙부의 인장 및 압축철근, 상부 콘크리트와 하부 GFSP에 철근게이지와 콘크리트 게이지를 각각 설치하였다. 보 처짐은 중앙부에서 LVDT를 사용하여 측정하였다. 한편 실험의 신

Table 2 실험보 명칭일람표

명칭	보강여부	재하형태	사전균열	재하속도 (mm/min)
STS02	무보강	단조증가	무	2
RTS02	무보강	반복하중	무	2
RTC02	무보강	반복하중	유	2
RTP02	GFSP 보강	반복하중	유	2
RTP20				20
RTP50				50

뢰성을 위하여 각 실험변수에 대해서 3회의 실험을 시행하였다.

Table 2는 실험보의 보강여부, 재하형태, 사전균열 유무 등에 따른 실험보의 명칭 일람표이다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 하중 처짐 곡선

Table 3은 각 시험체에 대한 균열확대 및 항복에 대한 하중, 처짐, 변형을 측정값을 정리한 것이다. 반복하중으로 인한 하중의 진동, 사전균열 발생을 위한 항복하중 재하, 사전균열의 불규칙성 등의 영향으로 변형을 값은 일정치 않았다. 그러나 MTS와 LVDT로 측정된 하중과 처짐은 각 실험체가 거의 같은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 여기서 시험체명의 끝 숫자는 각 시험체의 번호를 나타낸다.

Fig. 4은 사전균열을 발생시키기 위한 항복하중 및 반복하중의 기본자료 획득을 위한 실험보(STS02)의 단조증가 재하실험에서 얻어진 하중 처짐 곡선이다. 균열 및 항복현상이 뚜렷한 전형적인 RC보의 거동(3 직선)을 잘 나타내었다. 이 실험에서 획득한 항복강도는 50 KN이고 대응되는 항복변위는 10 mm 이었다.

Table 3 균열확대와 항복시의 하중 및 변형률

구분 시험체	균열확대				항복			
	하중 (KN)	처짐 (mm)	인장(GFSP) 변형률(10^{-6})	압축변형률(10^{-6})	하중 (KN)	처짐 (mm)	인장(GFSP) 변형률(10^{-6})	압축변형률(10^{-6})
STS(평균)	18.0	4.0	-	-	49.270	10.24	-	-
RTS02-1	18.34	1.16	74.29	-195.24	52.2	6.96	out	-674.29
RTS02-2	18.07	1.2	144.76	-144.76	47.96	6.84	out	-590.48
RTS02-3	17.9	1.06	36.19	-191.43	49.98	6.86	out	-733.33
RTC02-1	2.48	0.3	12.38	-2.86	49.13	6.86	out	-302.86
RTC02-2	2.83	0.4	541.90	-29.52	46.56	5.92	out	-658.10
RTC02-3	3.1	0.36	8.571	-42.86	47.24	6	out	-626.67
RTP02-1	3.295	0.28	72.38088	-30.4762	67.62	6.9	1965.712	-519.999
RTP02-2	3.42	0.2	37.143	-6.67	68.83	7.56	2333.33	-687.62
RTP02-3	1.66	0.32	out	out	67.88	7.24	2302.855	-755.237
RTP20-1	3.6725	0.34	74.28564	13.33332	69.74	7.1	2623.807	-829.523
RTP20-2	2.82	0.4	99.9999	-34.2857	70.74	7.2	2464.759	-904.701
RTP20-3	1.87	0.4	out	out	66.99	6.54	2219.045	-838.094
RTP50-1	6.1	0.48	159.0475	-55.238	70.82	7.54	2638.093	-799.047
RTP50-2	7.21	0.44	94.285	-49.5238	73.99	7.04	2118.093	-702.856
RTP50-3	10.79	0.84	out	out	71.31	7.82	3206.663	-1132.38

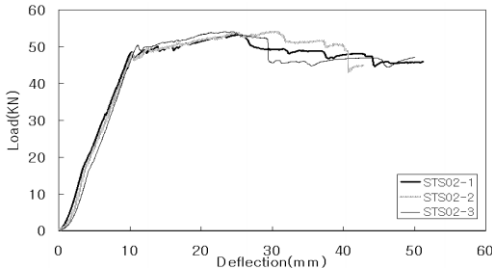


Fig. 4 단조증가 재하시험의 하중-처짐곡선

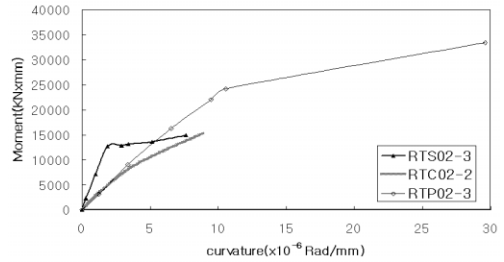


Fig. 6 시험체의 종류별 모멘트-곡률포락선

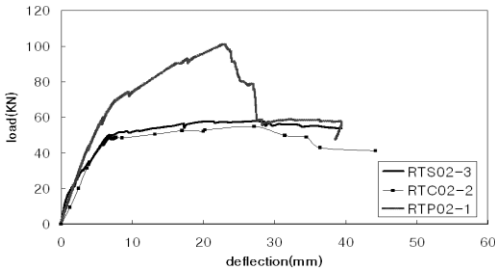


Fig. 5 보강방법에 따른 하중-처짐곡선

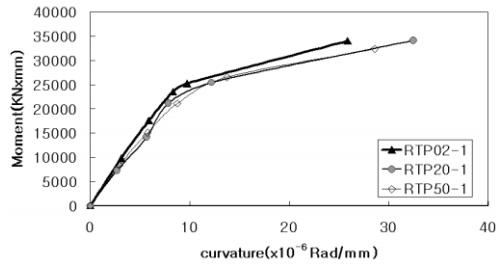


Fig. 7 재하속도별 모멘트-곡률포락선

Fig. 5는 GFSP의 보강효과를 조사하기 위하여 무균열보(RTS02), 사전균열보(RTC02), GFSP 보강보(RTP02)의 반복하중 재하시험에 대한 하중 처짐곡선을 도시한 것이다. GFSP 보강은 항복강도와 최대강도를 70% 및 100% 증대시켰다. 그러나 외부 부착된 GFSP가 처짐과 균열을 제어함으로써 항복 후 변형을 경화현상은 현저히 증가시키나 보의 연성은 감소시킴을 알 수 있다. 특히 최대강도 도달 후 GFSP의 파단에 의한 강도의 급격한 손실은 보강보의 전체강도에서 GFSP가 부담하는 부분이 매우 큼을 나타내는 것으로, 보강보의 취성파괴의 위험성을 내포하므로 보강보 설계에서 GFSP가 부담하는 강도의 예측이 매우 중요하다고 판단된다.

3.2 보강보의 모멘트-곡률곡선

Fig. 6은 무균열보, 사전 균열보, GFSP 보강보의 반복하중 재하에 따른 모멘트 곡률 포락선이다. RTS02, RTC02 등의 무보강 보의 휨 거동은 초기균열, 항복 등이 뚜렷한 RC보의 전형적인 거동특성(3직선)을 나타내는 반면에, GFSP 보강보는 초기균열 발

생점을 결정하기 어려운 2직선에 유사한 거동을 나타내었다. 이를 통해 GFSP 보강보는 사전균열에 의한 초기 휨강도 손실의 복원효과는 크지 않지만, 휨 강도 및 연성의 증가가 현저하고 파괴 시 까지 휨강도의 증가 양상이 안정적임을 알 수 있다.

Fig. 7은 GFSP 보강보의 재하속도에 따른 휨 성능의 변화양상을 조사하기 위해서 모멘트-곡률 곡선의 포락선을 도시한 것이다. 휨 거동과 강성도 저하양상은 재하속도에는 무관하지만, 항복모멘트와 보의 연성은 재하속도가 클수록 증가하였다.

3.3 보강보의 잔류처짐 특성

Fig. 8은 GFSP 보강보의 파괴특성을 조사하기 위해서 무균열보, 사전균열보, GFSP 보강보의 반복하중에 의한 잔류 처짐을 도시한 것이다. 항복이전의 잔류 처짐은 세 경우 차이가 없었지만, 항복 이후의 잔류 처짐량은 GFSP의 균열억제 효과에 의해서 보강보에서 현저히 감소되었다. 이러한 것은 파괴의 징후를 예측할 수 있는 균열이나 잔류처짐의 관측이 어렵기 때문에 보강보의 파괴예측에 어려움을 수반할 것으로 생각된다.

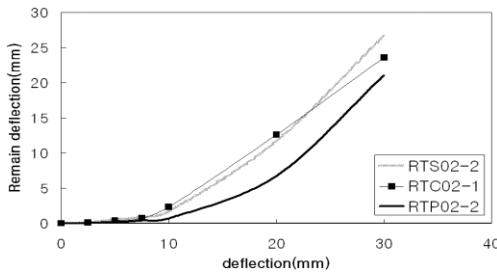


Fig. 8 시험체 종류별 잔류 처짐곡선

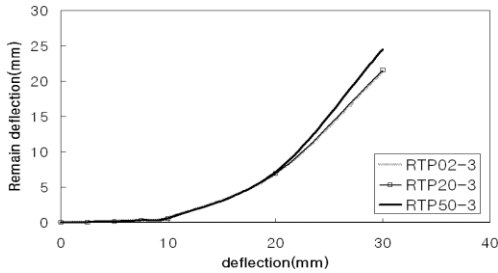
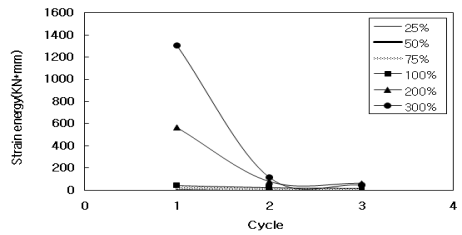


Fig. 9 재하속도별 잔류 처짐곡선

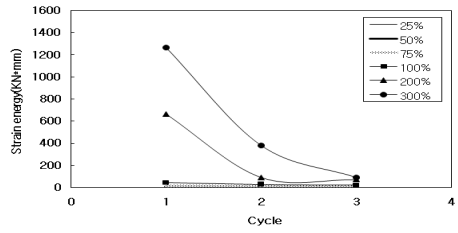
한편, Fig. 9는 재하속도를 달리한 GFSP 보강보의 잔류처짐을 도기한 것이다. 잔류처짐량은 재하속도에 관계없이 동일하였다. 따라서 재하속도는 잔류처짐에 의미있는 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

3.4 에너지 변화 특성

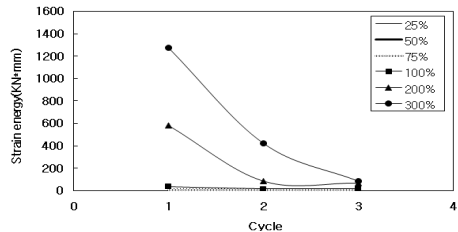
보의 재하 사이클 당 에너지는 하중 처짐곡선에서 재하경로의 면적으로 계산된다. 이 실험에서는 각 하중 단계별로 3회씩의 반복하중을 재하하였다. Fig. 10은 재하속도별 하중단계에 따른 재하 사이클별 변형에너지의 변화를 나타낸 것이다. 항복하중 이하에서는 사이클 증가에 따른 에너지 저장능의 감소가 없지만, 이를 초과하는 하중에서는 첫 사이클에서 두번째 사이클로 이행될 때 에너지 저장량 감소가 컸다. 이를 통해 보강보의 에너지 소산능력의 대부분은 항복이후의 비탄성변위에서 기인됨을 알 수 있고, 두번째 사이클 이후의 감소량은 매우 작으므로 반복하중 재하에서 반복횟수는 3회가 적절한 것으로 판단할 수 있다.



a) RTP02-1



b) RTP20-1



c) RTP50-1

Fig. 10 하중단계/ 사이클 당 에너지 변화곡선

3.5 균열의 성장 및 확대

Fig. 11은 재하속도별 GFSP 보강보의 균열성장 및 확대를 도기한 것이다. 진한 표시는 사전균열을, 옅은 표시는 보강 후 재하시험에서 발생한 균열을 나타내며, 표기된 숫자는 균열발생시의 하중을 나타낸다. 사전균열은 휨균열로서 대부분 보의 중앙부에서 발생하였고, 균열폭은 크지 않았다. GFSP의 앵커에 의한 정착효과로 전반적인 균열의 숫자는 적었다. 파괴를 유도하는 균열의 성장은 재하점 직하의 전단력 급변점 부근의 사전균열에서 시작되었다. 이 균열의 확대는 전단력에 의한 보 하부의 단차로 가속되고, 이로 인해 GFSP의 유리섬유가 파단되었다. 한편 재하속도가 빠를수록 새로운 균열의 발생은 적은 반면에 기존균열의 확장속도는 빨랐다.

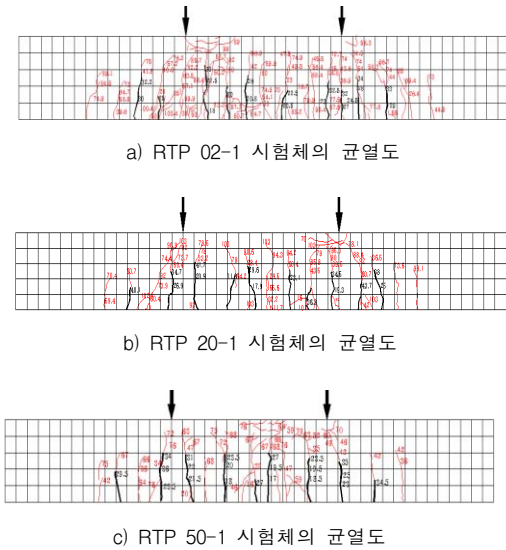


Fig. 11 GFSP 보강보의 균열도

3.6 GFSP 보강보의 파괴

Fig. 12는 GFSP 보강보의 파괴 형상을 나타낸 것이다. 재하속도에 무관하게 모든 보강보의 파괴는 GFSP의 유리섬유 파단으로 시작되었다. 정착에 앵커를 사용함으로써 외부 부착 보강공법에서 나타나는 보강재의 탈착에 의한 보강효과의 조기상실 현상은 없었다. 그러나 앵커정착에 의한 GFSP의 처짐 및 균열제어로 인한 잔류처짐의 감소로 보강보의 파괴예측이 어려웠고, 파괴시 GFSP의 유리섬유 파단은 급격하였다. 따라서, 취성파단에 대비하여 보강보 설계 시 보다 보수적인 강도감소계수를 채택하는 것이 필요한 것으로 생각된다.

4. 결론

이 연구는 보강이 필요한 사용 중인 보의 손상과 재하상태를 모의하기 위하여, 항복하중의 75%에 대응하는 변위를 재하하여 사전균열을 발생시키고, 재하속도를 달리하는 반복하중 재하실험을 수행하였다. 보강보의 실험을 통해서 얻어진 결론은 다음과 같이 정리된다.



a) 측면 균열형상



b) 하부 GFSP의 파단형상

Fig. 12 균열 및 GFSP의 유리섬유 파단

- 1) GFSP 보강보는 무보강보에 비해서 항복 강도와 최대강도가 각각 70% 및 100% 증가되었다. 그러나 GFSP의 균열 및 처짐 제어에 의한 항복 후 큰 변형을 경화현상으로 인해 보강보의 연성증가는 크지 않으므로 보강보의 취성파괴를 대비하여 보강보 설계 시 GFSP가 분담하는 강도를 예측하는 것이 중요하다.
- 2) 모멘트 곡률곡선에서 무보강보(RTS02, RTC02)는 초기균열, 항복 등이 뚜렷한 전형적인 RC거동(3직선)을 나타내는 반면, GFSP 보강보는 초기균열 발생점을 결정하기 어려운 2직선에 유사한 거동을 나타내었다. GFSP는 사전균열의 복원기능은 증대시키지 않지만 휨강도는 현저하게 증가시켰다. 한편 보강보의 모멘트 곡률곡선에서 재하속도가 빠를수록 항복 모멘트와 연성은 증가되었다.
- 3) GFSP의 강한 부착력 및 정착기능에 의해 사전균열외의 추가적인 균열발생이 제어되어 잔류처짐이 현저히 감소하였다. 이러한 현상은 파괴예측의 어려움을 수반 할 수 있으므로 보다 보수적인 강도감

소계수를 고려하는 것이 필요하다고 생각된다.

- 4) 재하속도별 하중단계에 따른 반복하중 재하 사이클 당 저장에너지의 변화는, 항복하중 이하에서는 반복재하에 따른 에너지 저장능의 감소는 없었다. 그러나 항복하중을 초과하는 하중단계에서는 첫 사이클에서 두 번째 사이클로 이행할 때 에너지 손실량이 가장 크며, 이후 사이클에서의 손실량은 매우 적었다.
- 5) GFSP 보강보는 최대강도에 도달할 때까지 균열의 성장과 전파는 미미하며, 최대강도 도달 후 GFSP의 유리섬유 파괴와 더불어 균열과 처짐이 급속히 확대되고 증가하면서 급속히 파괴되는 성향을 나타내었다. 따라서 이러한 파괴특성은 보강보의 설계에 있어서 반드시 고려되어야 할 부분으로 판단된다.
- 6) GFSP 보강보의 파괴는 보강재의 조기 탈락으로 인해 파괴 되는 것이 아니라 재하점 직하의 전단력 급변점에서 성장된 사전균열의 확대에 의한 GFSP의 유리섬유파단에 의한 보강능력의 상실에서 시작되므로, GFSP 부착 공법은 섬유시트 보강 공법의 부착강도 미확보에 의한 보강재의 조기 탈락 현상을 충분히 보완한다고 결론지을 수 있다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부 지역특성화 연구개발 사업의 연구비지원(과제번호:C105E1020001-06E020200210)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 홍건호, 신영수, "RC 구조물에 적용된 부착식 휨보강 공법의 보강성능평가", 한국콘크리트학회 논문집, 제 15권, 1호, 2003, pp. 78-86.
2. 조백순 외 2명, "FRP 시스템 보강 철근콘크리트 구조부재의 휨성능", 2005년도 대한토목학회 정기 학술 발표회 논문집, 2005, 10, pp. 604-607.
3. 황태일, "R.C 보에 부착된 섬유시트의 파단변형을 평가에 관한 실험적 연구", 경성대학교 대학원 석사학위 논문, 2003, 2.
4. 김태우, "FRP보강 RC보의 조기파괴기준 I", 2005년도 한국 콘크리트학회 가을 학술 발표회 논문집, 2005, pp. 137-140.
5. 김태우, "FRP보강 RC보의 조기파괴기준 II", 2005년도 한국 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 2005, pp. 141-144.
6. 이우철, "탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 휨거동 특성에 관한 연구", 부산대학교 대학원 박사학위논문, 2005, 2.
7. 허성재, "Glass fiber-Steel Plate로 보강된 RC 보의 전단 거동에 대한 실험적 연구", 경성대학교 일반대학원 석사학위논문, 2006, 8.
8. 장종완, "반복하중을 받는 CFS로 보강된 R/C 보의 휨 강성", 경성대학교 일반대학원 석사학위논문, 2004, 2.
9. 이동원, "CFS로 보강된 RC보의 양생중 반복하중이 보강효과에 미치는 영향에 대한 실험적 연구", 부경대학교 산업대학원 석사학위논문, 2004, 8.

급행(접수일자 : 2007년 4월 18일)