

AFRP로 보강된 철근콘크리트 슬래브의 휨 거동에 관한 연구

A Study on the Flexural Behavior of RC Slabs with Externally Bonded Aramid Fiber Sheets

박 홍 용*

Park, Hong Yong

최 익 창**

Choi, Ik Chang

홍 규 창***

Hong, Kyu Chang

박 재 흥***

Park, Jae Hong

ABSTRACT

The reinforced concrete slabs with epoxy-bonded AFRP sheets were experimentally investigated. Experimental data on strength, stiffness, steel strain, deflection and mode of failure of strengthened slabs were obtained, and comparisons between the different flexural reinforcing schemes and reinforced concrete slabs without AFRP sheets were made. The results generally indicate that the flexural strength, ductile behavior of strengthened slabs increased.

1. 서론

건설재료로 오랫동안 널리 사용되고 있는 콘크리트는 염해, 중성화, 시간 의존적인 열화 등의 각종 원인에 의하여 손상을 입게되어 원래의 설계목적대로 구조물이 제 기능을 발휘할 수 없게 되며, 내구성도 떨어지게 된다. 또한, 도로 구조물의 경우에는 교통량이 늘어나고, 하중의 크기가 커짐에 따라 구조물의 보수·보강이 필요하며, 지진에도 견딜 수 있는 구조물의 성능이 요구되고 있다. 콘크리트 구조물의 보수·보강 공법에는 강판 접착, 콘크리트 덧치기, 철근 추가 보강 등의 공법이 있으나, 시공이 까다롭고 보강효과도 경우에 따라서는 기대하기가 어렵다. 그래서 최근 경량이며 시공이 간단한 FRP(Fiber Reinforced Plastic)제품을 건설분야에 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 지금까지의 연구는 콘크리트 부재의 인장면에 FRP 직포를 보강하여, 콘크리트 부재의 파괴강도를 측정하는데 초점을 두어 왔으며, 사용하중상태에서 FRP 직포로 보강된 콘크리트 부재의 내하거동에 대한 연구는 거의 없었다. 본 연구에서는 내충격성이 우수하고 고강도인 AFRP(Aramid Fiber Reinforced Plastic) 직포로 보강한 철근콘크리트 슬래브에 대한 실험을 하여, AFRP 직포의 보강량, 보강 형태에 따른 사용하중상태 및 극한하중상태에서의 휨 거동을 알아본다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료

본 연구에서의 공시체 및 시험체에 사용한 콘크리트는 모두 보통강도의 레미콘을 사용하였다. 콘크리트의 압축강도 및 인장강도 실험은 재령 90일에 시험체의 재하 실험시에 행하여졌으며, 평균 압축강도는 239.63 kg/cm^2 이고, 평균 인장강도는 54.264 kg/cm^2 이다. 표 1.은 콘크리트의 배합 설계를 나타낸 것이다.

* 정회원, 명지대학교 SOC 공학부 교수

** 정회원, 목포해양대학교 해양/조선공학부 전임강사

*** 명지대학원 석사과정

표 1. 콘크리트의 배합 설계

슬럼프 (cm)	굵은골재 최대치수(mm)	단위수량 (kg/cm ³)	단위시멘트량 (kg/cm ³)	잔골재량 (kg/cm ³)	굵은골재량 (kg/cm ³)	공기량 (%)
10	25	178	328	703	1130	2

각 시험체에 사용한 인장철근은 D16으로, 항복강도 $\sigma_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$ 이고, 탄성계수 $E_s = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 이다. 또한 보수·보강에 사용한 AFRP 직포의 인장강도 $\sigma_{fv} = 30,000 \text{ kg/cm}^2$, 탄성계수 $E_f = 1.16 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 이다. 콘크리트 인장면에 AFRP 직포 부착은 콘크리트의 표면을 처리한 후에 에폭시를 사용하였다. 표 2.는 AFRP 직포의 재료 특성을 나타낸 것이다.

표 2. 고탄성 AFRP 직포의 재료 특성

인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	파단신율 (%)	비중	두께 (mm)	단위면적당중량 (g/m ²)
30000	1.16×10^6	2.4	1.82	0.208	300

2.2 시험체의 형상

2.2.1 B 시리즈

B 시리즈의 시험체는 총 6개를 제작하였으며, 그림 1.은 시험체의 형상 및 재하위치를 나타낸 것이다. 총 길이가 3.0m이고, 순 지간이 2.5m, 폭이 33cm, 두께가 18cm 이며, 인장철근량은 모든 시험체에 동일하게 $A_s = 3D16 = 5.96 \text{ cm}^2$ 이다.

실험변수는 AFRP 직포의 보강 유무, 사전 균열 유무, 정착부의 보강 유무, AFRP 직포의 보강량이다. 시험체 B1은 AFRP 직포를 보강하지 않은 것으로 기준 시험체이다. 시험체 B2는 균열이 있는 실체구조물에 대하여 보수·보강효과를 알아보기 위한 시험체로서, 시험체에 미리 균열을 준 후에 AFRP 직포를 보강하였다. 시험체 B3은 보강 전 균열 유무에 따른 보강효과를 알아보기 위한 것으로, 미리 균열을 주지 않은 것을 제외하면 시험체 B2와 동일하다. 시험체 B4는 AFRP 직포의 박리에 의한 정착부 이탈을 방지하기 위하여 양단 정착부에 길이방향과 직각으로 1점의 직포를 보강한 시험체이며, 보강폭은 30cm이다. 시험체 B5는 AFRP 직포가 1점인 경우와 비교하기 위해서 시험체 B4의 중앙부에 길이 1.5m의 직포를 추가로 부착하였다. 시험체 B5에서는 2점의 보강효과를 다른 시험체와 비교해보기로 한다. 시험체 B6은 추가 보강 직포의 길이를 2.5m로 하는 것 이외에는 시험체 B5의 보강 방법과 같다. 표 3.은 각 시험체의 보강 형태를 나타낸 것이다.

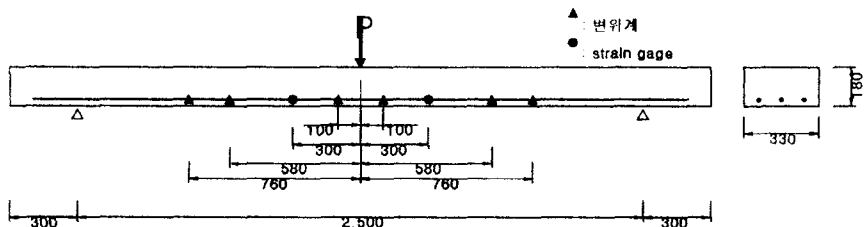


그림 1. B 시리즈 시험체의 형상 및 재하도

2.2.2 S 시리즈 시험체

S 시리즈 시험체는 거더로 지지된 교량의 바닥판을 상정한 것으로 총 5개를 제작하였다. 시험체의 크기는 B 시리즈 시험체와 두께 및 지간길이가 같고, 폭은 2.5m로 하였다.

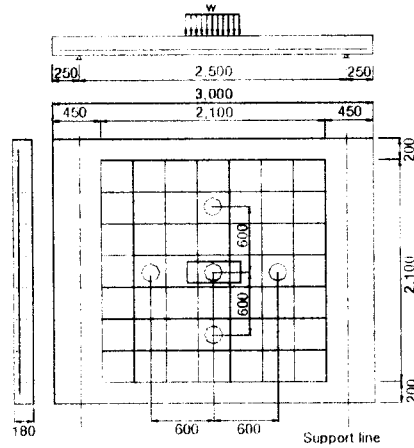


그림 2. S 시리즈 시험체의 형상 및 재하도

표 3. B 시리즈 시험체의 보강 형태

시험체	보강길이(mm)	보강방법
B1	--	--
B2	2500	1 ply
B3	2500	
B4	2500	1 ply, anchor 1 ply
B5	2500+1500	2 plies, anchor 1 ply
B6	2500+2500	2 plies

표 4. S 시리즈 시험체의 보강 형태

시험체	보강길이(mm)	보강방법
S1	--	--
S2	2500	1 ply, CTC 550mm
S3	2500	1 ply, CTC 550mm
S4	2500 +2500	2 plies, CTC 550mm
S5	2500	1 ply, 직각방향전면보강

그림 2.는 S 시리즈 시험체의 형상 및 재하위치를 나타낸 것이다. 주철근량과 배력철근량은 각각 $A_s = 8D16 = 15.893 \text{ cm}^2$ 이며, 주철근과 배력철근은 30cm 간격으로 배치하였다.

시험체 S1은 AFRP 직포를 보강하지 않은 것으로 기준 시험체이다. 시험체 S2는 균열이 있는 실제 구조물에 대하여 보수·보강효과를 알아보기 위한 시험체로서, 시험체에 미리 균열을 준 후에 길이 2.5m의 AFRP 직포를 폭 방향으로 25cm의 간격을 두고 지간 방향으로 보강하였으며, 양단 정착부에는 폭 방향으로 1결의 AFRP 직포를 부착하였다. 시험체 S3은 보강 전 균열유무에 따른 보강효과를 알아보기 위한 것으로, 미리 균열을 주지 않은 것을 제외하면 시험체 S2와 동일하다. 시험체 S4는 슬래브에 거북등 모양의 균열이 발생된 경우를 상정하여 AFRP 직포를 보강한 것으로, 시험체의 가로와 세로 방향으로 폭 30cm의 AFRP 직포를 25cm의 간격을 두고 보강했다. 시험체 S5는 AFRP 직포를 전면보강 했으며, 직포의 방향성을 알아보기 위한 시험체로 AFRP 직포를 직각방향으로 부착시켰다. 표 4.는 S 시리즈 시험체의 보강 형태를 나타낸 것이다.

2.3 재하 방법

본 연구의 재하실험은 Hydraulic Actuator를 이용하였으며, B 시리즈 재하 방법은 1.5ton까지 하중을 3회 반복재하 한 후에 파괴될 때까지 재하하였다.

인장철근의 변형률과 AFRP 직포의 변형률을 측정하기 위하여 재하점으로부터 양방향으로 30cm 지점에 스트레인 게이지를 인장철근과 AFRP 직포에 부착하였다(그림 1 참조). 또한, 변위계를 재하점으로부터 양방향으로 10cm, 58cm, 76cm의 지점에 설치하여 처짐량을 측정하였으며, 균열폭은 균열경을 이용하여 측정하였다.

S 시리즈는 설계트럭하중의 뒷바퀴 접지면적의 크기를 모델로 한 20cm × 50cm의 접지판을 이용하여

시험체의 증상에 재하하였으며, 재하 방법은 4.5ton까지 하중을 3회 반복재하 한 후에 파괴될 때까지 재하하였다. 철근의 변형률은 시험체 제작시 철근에 부착한 스트레인 게이지로 측정하였으며, FRP 직포의 변형률은 철근에 부착한 스트레인 게이지와 같은 위치에 부착한 스트레인 게이지로 변형률을 측정하였다. 또한, 시험체의 중앙점에서 열 십자 모양으로 60cm 떨어진 곳에 총 5개의 변위계를 설치하여 처짐량을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 B 시리즈의 실험 결과

표 5.는 B 시리즈 시험체의 실험 결과를 나타낸 것이며, 각 시험체의 극한강도와 시험체 B1과의 극한강도 비와 파괴형태를 나타낸 것이다. FRP 직포를 보강한 시험체 B2~B6의 파괴강도는 FRP 직포를 보강하지 않은 시험체 B1의 파괴강도에 비하여 1.5~2.0배의 값을 나타내고 있다. 파괴형태는 FRP 직포를 보강하지 않은 시험체 B1은 휨 인장 파괴가 일어났으나, FRP 직포를 보강한 시험체 B2~B6은 전단 파괴가 일어났다. 이것은 FRP 직포에 의해 휨 보강이 충분히 이루어졌기 때문이다. FRP 직포를 보강하지 않은 시험체 B1은 작용하중의 증가에 따라 휨 인장 균열이 발생한 후

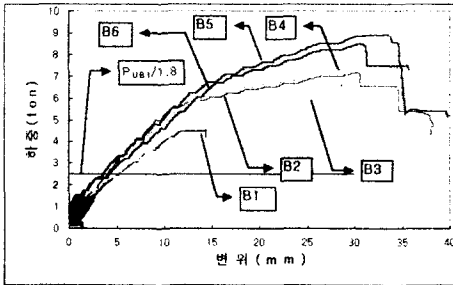


그림 3. B시리즈 시험체의 하중-처짐 곡선

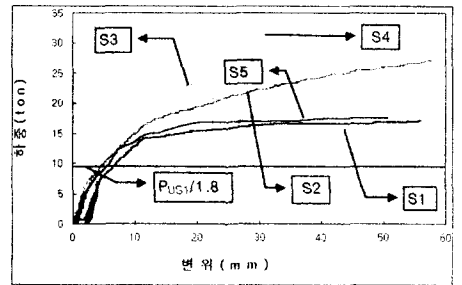


그림 6. S 시리즈 시험체의 하중-처짐 곡선

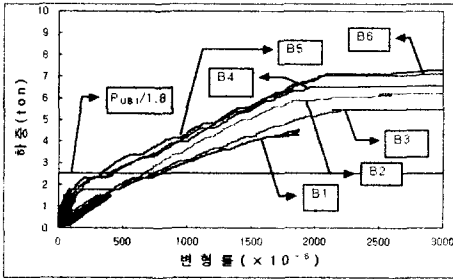


그림 4. B 시리즈 시험체의 하중-철근 변형률 곡선

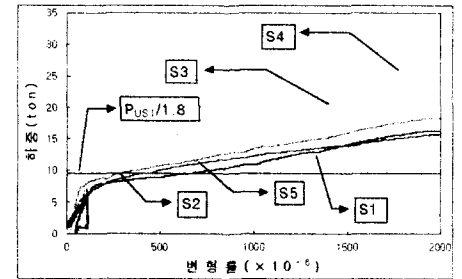


그림 7. S 시리즈 시험체의 하중-철근 변형률 곡선

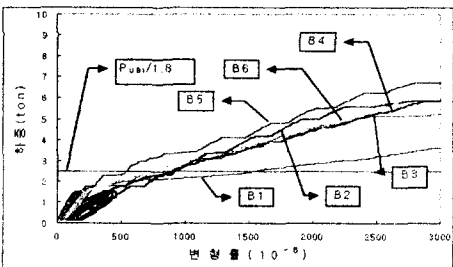


그림 5. B 시리즈 시험체의 하중-AFRP 직포 변형률 곡선

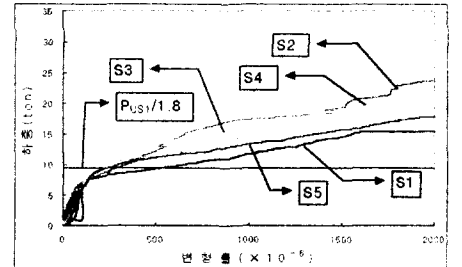


그림 8. S 시리즈 시험체의 하중-AFRP 직포 변형률 곡선

표 5. B 시리즈 시험체의 실험 결과

시험체	극한하중 $P_{B_{ij}}$ (ton)		파괴 형태
	실험값	$P_{B_{ij}}/B1^*$	
B1	4.5	1.00	휨 파괴
B2	7.2	1.60	전단 파괴
B3	6.7	1.48	전단 파괴
B4	7.4	1.64	전단 파괴
B5	8.9	1.97	전단 파괴
B6	8.5	1.89	전단 파괴

표 6. S 시리즈 시험체의 실험 결과

시험체	극한하중 $P_{S_{ij}}$ (ton)		파괴 형태
	실험값	$P_{S_{ij}}/S1^{**}$	
S1	17.1	1.00	휨 파괴
S2	26.3	1.54	AFRP 직포의 박리 후 파괴
S3	27.2	1.59	AFRP 직포의 박리 후 파괴
S4	32.8	1.92	AFRP 직포의 박리 후 파괴
S5	18.5	1.08	휨 파괴

* $P_{B_{ij}}/B1$: 각 B 시험체 극한강도와 B1의 극한강도 비

** $P_{S_{ij}}/S1$: 각 S 시험체 극한강도와 S1의 극한강도 비

에 휨 인장철근의 항복으로 파괴가 일어났다. 그러나, AFRP 직포를 보강한 시험체 B2~B6은 작용 하중의 증가에 따라 휨 인장 균열이 발생한 후에 휨 인장철근은 항복하지만, AFRP 직포는 휨에 대하여 계속 저항하며, 계속된 작용하중의 증가에 따라 사인장 균열이 발생하고, 사인장 균열이 직접적인 부재의 파괴 원인이 된다. 결국, 전단 파괴가 일어난 후에 AFRP 직포의 파단이 일어났다. 본 실험에서는 AFRP 직포의 보수·보강에 문제점인 AFRP 직포의 박리에 의한 파괴는 일어나지 않았다.

그림 3.은 B 시리즈 시험체의 하중과 처짐 관계를 나타낸 것이며, 변위계의 위치는 부재 중앙에서 10cm 떨어진 곳이며, 그림 4.는 하중 증가에 따른 인장철근의 변형률 변화를 나타낸 것이다. 변형률의 측정 위치는 부재의 중앙에서 10cm 떨어진 곳이며, 그림 5.는 인장철근과 같은 위치에서의 AFRP 직포 변형률 변화를 나타낸 것이다. 단, AFRP 직포를 보강하지 않은 시험체 B1은 콘크리트 표면에서의 변형률을 나타낸 것이다. 사전 균열을 준 시험체 B2는 시험체 B3에 비해 휨 강성이 크게 나타나고 있다. 또한, 균열의 양상은 균열을 보수한 곳에서는 다시 균열의 진전은 없으며, 균열을 보강한 부근의 콘크리트에서 균열이 발생했다. 이것은 사전 균열이 생긴 곳에 예폭시로 보수한 후에 AFRP 직포로 보강한 방법이 충분한 효과가 있음을 나타내고 있다.

정착부 앵커의 유무에 따른 시험체 B3과 시험체 B4의 비교에서, 휨 강성은 정착부 앵커가 있는 시험체 B4가 시험체 B3보다 크게 나타나고 있으며, 그림 4.의 하중-철근의 변형률 곡선에서 휨 균열 발생 전까지는 거의 같은 변형 거동을 보였으나, 휨 균열 발생 후에는 시험체 B4가 작은 변형을 보였다. 또한 사용하중상태에서, 앵커로 정착한 시험체 B4의 복원력이, 앵커로 정착하지 않은 시험체 B3의 복원력 보다 우수함을 나타내고 있다.

AFRP 직포의 보강량을 달리한 시험체 B4와 시험체 B5에서는 2겹의 AFRP 직포를 보강한 시험체 B5가 극한강도 및 휨 강성에서 큰 값을 보이고 있다. 그러나, 2겹체의 AFRP 직포를 정착부까지 보강한 시험체 B6과 정착부 앞까지 보강한 시험체 B5는 휨 강성, 인장철근의 변형, AFRP 직포의 변형 등이 거의 유사한 거동을 보이고 있다.

그림 3~5.에서 보이는 것처럼 AFRP 직포에 의한 보강 효과는 사용하중상태에서 복원력, 휨 강성, 극한강도에서 보강효과가 충분함을 나타내고 있으며, 변형능력 면에서도 AFRP 직포를 보강하지 않은 시험체 B1에 비해서 2배 이상을 나타내고 있다.

3.2 S 시리즈 시험체의 실험 결과

그림 6.은 S 시리즈 시험체의 하중과 처짐 관계를 나타낸 것이며, 변위계의 위치는 시험체 중앙에서 60 cm 떨어진 곳이다. AFRP 직포를 보강하지 않은 기본 시험체 S1과 미리 균열 준 후에 보강한 시험체 S2, AFRP 직포를 2겹으로 보강한 시험체 S4의 휨 거동을 비교해 보면, 휨 균열 발생 전까지는 거의 같은 거동을 보이나, 균열 발생 후 보강량이 많은 것이 휨 강성이 크게 나타나고 있으며, 극한강도도 크게 나타나고 있다.

시험체 S4는 처짐 22mm에서 슬래브가 극한상태에 이르러 파괴된 것으로 보이며, 극한하중에서 보강 효과를 충분히 발휘하여, 적은 처짐에서 극한상태에 이르는 것을 보이고 있다.

그림 7.은 시험체 중앙점에서 15 cm 떨어진 위치에서의 하중 증가에 따른 철근의 변형률을 나타낸 것이며, 시험체 S1은 휨 균열 발생 후, 응력 재분배에 의한 인장철근의 분담량의 증가로 인장철근의 변형률은 급격히 증가하고, 약 16.5ton의 하중에서 인장철근은 소성영역에 돌입했음을 알 수 있다. 시험체 S3와 시험체 S4는 인장철근이 항복한 후에도 하중이 증가하는 것을 나타내고 있으며, 이것은 인장철근의 항복 후에도 AFRP 직포가 휨 저항을 하기 때문이다.

그림 8.은 철근과 같은 위치에서의 AFRP 직포 변형률을 나타낸 것이며, 모든 시험체에서 휨 균열 발생 전까지의 AFRP 직포 변형률은 거의 비슷하게 나타나고 있으나, 휨 균열의 발생 후에 각 시험체에서의 AFRP 직포 변형률은 서로 다름을 알 수 있다. 또한, 시험체가 파괴될 때 측정된 AFRP 직포의 변형률은 파단 변형률인 24000×10^{-6} 에는 크게 못 미친 것을 알 수 있다. 이는 AFRP 직포가 파단에 이르기 전, 박리에 의하여 시험체의 파괴가 일어났기 때문이다. 시험체 S4는 다른 시험체에 비해서 극한강도 면에서는 탁월하나, 변형능력은 작은 값을 보이고 있다. 이것은 AFRP 직포를 격자모양으로 보강하였기 때문에 지간 방향의 휨 변형을 구속하여 처짐이나 변형이 작게 일어났기 때문이다.

4. 결론

본 연구는 AFRP 직포로 보강한 슬래브를 실험하여, AFRP 직포의 보강량, 보강 형태에 따른 사용하중 상태 및 극한하중상태에서 인장철근과 AFRP 직포의 변형거동을 파악하고, 극한하중상태에서 콘크리트, 보강철근, AFRP 직포의 저항력을 평가하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. B 시리즈 시험체에서 AFRP 직포로 보강한 시험체가 AFRP 직포로 보강하지 않은 시험체에 비하여 휨 강성이 크게 나타났으며, 극한강도는 1.5~2.0 배 정도가 크고, 변형능력은 2배 이상을 나타내고 있다.
2. 미리 균열을 준 후에 AFRP 직포를 보강한 시험체 B2는 미리 균열 주지 않고 AFRP 직포를 보강한 시험체 B3에 비해 초기 휨 강성은 작게 나타나고 있으나, 극한상태에서는 동등 또는 그 이상의 효과가 있음을 나타내고 있다.
3. AFRP 직포를 정착부에 부착한 B 시리즈 시험체는 AFRP 직포를 단순히 부착한 시험체에 비하여, 극한강도, 인장철근의 변형능력, AFRP 직포의 변형능력, 처짐 등의 내하 거동에서 매우 양호한 효과가 있으며, AFRP 직포의 박리를 방지할 수 있는 효과적인 방법이라고 생각된다.
4. S 시리즈 시험체의 극한강도는 AFRP 직포를 보강하지 않은 시험체 S1에 비하여, AFRP 직포를 1 겹 보강한 시험체 S2,S3은 약 1.5배, AFRP 직포를 격자 모양으로 보강한 시험체 S4는 약 2.0배 정도를 나타냈다. AFRP 직포를 격자 모양으로 보강한 시험체 S4는 직포의 격자상의 겹치는 부분에서 파단이 일어났다.

감사의 글

본 연구는 창조화성(주)와 공동연구의 일부이며, 창조화성(주)에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. J. L. Clark, "Alternative Materials for the Reinforcement And Prestressing of Concrete", Blackie A & P
2. H. Ichimasu, et al, "RC Slabs Strengthened by Bonded Carbon FRP Plates",
3. Takahashi Y., et al, "Flexural Behavior of RC Beams with Externally Bonded Carbon Fiber Sheet", Proceedings of 3rd International Symposium on Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol. 1, pp. 327-334, 1997.10