
FRP 보강 철근콘크리트 슬래브의 휨 거동

Flexural Behavior of RC Slabs Strengthened with FRP



박홍용*

Park, Hong-Yong

ABSTRACT

Recently, the need for strengthening reinforced concrete and prestressed concrete structure is increasing, particularly when there is an increase in load requirements, a change in use, a degradation problem, or some design/construction defects. Therefore, use of composite materials for structural repair presents several advantages and has been investigated all over the world.

In this paper, the reinforced concrete slabs with epoxy - bonded AFRP sheet were experimentally investigated. Experimental data on strength, stiffness, material 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. It can be concluded that flexural strength of RC slabs strengthened with AFRP has increased, and that ductility of strengthened slabs has decreased.

Keywords : strengthening, structural repair, AFRP, flexural reinforcing schemes
ductility

* 정희원, 명지대학교 SOC공학부 토목·환경공학과 교수

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2000년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트 구조물은 여러 원인에 의하여 원래의 설계목적대로 제 기능을 발휘할 수 없게 되며, 내구성도 떨어진다. 도로 구조물의 경우에는 교통량이 늘어나고, 통행하중의 크기가 커짐에 따라 구조물의 보수·보강을 필요로 한다.

콘크리트 구조물의 보수·보강 공법에는 강판접착, 콘크리트 덧치기, 철근 추가 보강 등의 공법이 있으나, 시공이 까다롭고 보강효과도 기대하기 어려운 경우가 많아서, 시공이 간단하고 보수·보강효과도 큰 FRP(Fiber Reinforced Polymer)제품을 건설분야에 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 지금까지 대부분의 연구는 FRP를 보강한 부재의 극한거동을 파악하는데 중점을 두어 왔으며, 그에 비하여 사용하중 상태에서의 휨 거동에 대한 연구는 미미하였다^(1,3,5).

본 연구에서는 AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer)로 보강된 철근콘크리트 슬래브에 대한 실험을 통하여 사용하중상태 및 극한하중상태에서 각 구성재료의 거동과 부재의 거동에 대하여 알아보았다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 콘크리트

콘크리트는 모든 공시체에 동일한 강도의 콘크리트를 사용하기 위하여 레미콘을 사용하였다. 압축강도시험과 휨 인장강도시험을 통하여 얻어진 강도는 각각 240 kgf/cm^2 와 32 kgf/cm^2 이다.

Table 1은 실험에 사용한 콘크리트의 배합설계를 나타낸 것이다.

Table 1 Concrete mix design

Slump (cm)	Max. Aggregate Size (mm)	W/C (%)	Air Content (%)
10	25	50	2

2.1.2 인장철근

시험체에 사용한 인장철근은 D16으로, 항복강도 $f_y=3500 \text{ kgf/cm}^2$ 이고, 탄성계수 $E_s=2.00 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이다.

2.1.3 AFRP 직포 (AFRP Sheet)

본 연구에서 사용한 AFRP 직포는 고탄성 AFRP 직포로 인장강도 $f_{tu}=30,000 \text{ kgf/cm}^2$, 탄성계수 $E_f=1.16 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, 두께는 0.208 mm이다.

2.2 시험체의 형상

시험체는 총 6개를 제작하였으며, 시험체의 전체 길이는 3.0 m이고, 지간 길이가 2.5 m, 폭이 33 cm, 두께가 18 cm이다. 인장철근량은 모든 시험체에 동일하게 $A_s=3D16=5.96 \text{ cm}^2$ 이다. Fig. 1은 시험체의 형상 및 시험체의 인장철근에 부착한 스트레인 게이지의 위치, 처짐량을 측정하기 위한 변위계(LVDT)의 위치, 그리고, AFRP에 부착한 스트레인 게이지의 위치를 나타낸 것이다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 인장철근과 부재 바닥면의 AFRP에 부착한 스트레인 게이지의 위치는 같다.

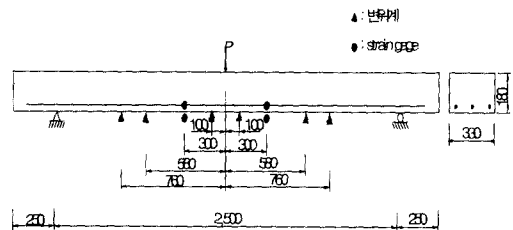


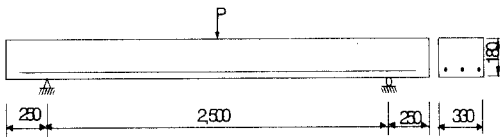
Fig. 1 Test Set-up

Table 2는 각 시험체의 AFRP 보강 전 상태, 보강길이, 보강방법 등의 시험체 조건을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 AFRP의 보강효과를 알아보기 위하여 AFRP의 보강유무, AFRP의 보강량, 사전 균열의 유무 등을 실험변수로 하였다.

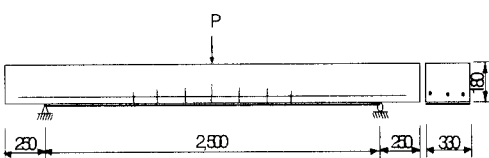
Table 2 Description of specimen (Unit : mm)

Condition	AFRP Length	Scheme	
B1	--	--	
B2	precracked	2500	1ply
B3	virgin	2500	1ply
B4	virgin	2500	1ply anchor 1ply
B5	virgin	2500+1500	2plies, anchor 1ply
B6	virgin	2500+2500	2plies, anchor 1ply

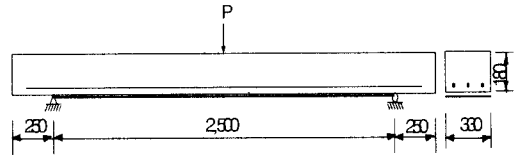
시험체 B1은 AFRP 직포를 보강하지 않은 것으로 기본 시험체이다. 시험체 B2는 균열이 있는 실제구조물에 대하여 보수·보강효과를 알아보기 위한 시험체로서, 시험체에 미리 균열을 준 후에 AFRP 직포를 보강하였다. 시험체 B3은 보강 전 균열 유무에 따른 보강효과를 알아보기 위한 것으로, 미리 균열을 주지 않은 것을 제외하면 시험체 B2와 보강방법이 동일하다. 시험체 B4는 AFRP 직포의 바리에 의한 정착부 이탈을 방지하기 위하여 양단 정착부에 길이방향과 직각으로 한 겹의 직포를 보강한 시험체이며, 보강 폭은 30 cm이다. 시험체 B5는 AFRP 직포를 한 겹 보강한 경우와 비교하기 위하여 시험체 B4의 중앙부에 길이 1.5 m의 직포를 추가로 부착하였다. 시험체 B5는 두 겹의 보강효과를 비교해보기 위한 시험체이다. 시험체 B6은 추가 보강 직포의 길이를 2.5 m로 하는 것 이외에는 시험체 B5와 보강방법이 같다. Fig. 2는 각 시험체의 보강형태를 나타낸 것이다.



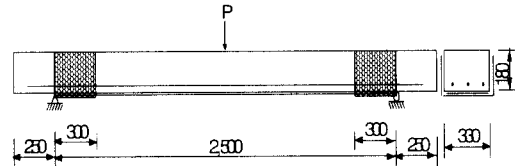
(a) B1



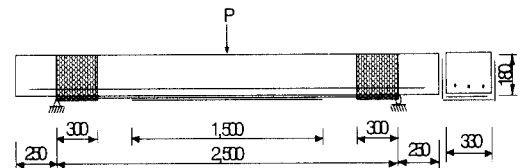
(b) B2 - precracked, 1 ply(330×2500×0.208)



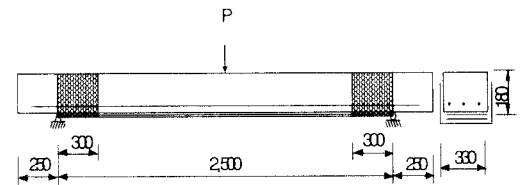
(c) B3 - virgin, 1 ply(330×2500×0.208)



(d) B4 - virgin, 1 ply(330×2500×0.208)
anchor 1 ply



(e) B5 - virgin, 2 plies(330×2500×0.208+330×1500×0.208)
anchor 1 ply



(f) B6 - virgin, 2 plies(2×330×2500×0.208)
anchor 1 ply

Fig. 2 Specimens

2.3 재하방법

시험체의 재하는 유압식 가력기를 사용하여 시험체의 중앙에 집중하중을 재하하였다. 재하방법은 각각의 시험체에 대하여 1.5 ton까지의 사용하중을 50 kgf/s의 재하속도로 3회 반복 재하한 후에 0.2 ton씩 50 kgf/s의 재하속도로 10회 재하하고, 그 이후에는 변위제어로 2 mm씩 0.05 mm/s의 재하속도로 10회 재하시킨 후, 파괴될 때까지 0.1 mm/s의 재하속도로 4 mm의 변위로

파괴될 때까지 재하하였다. 특히, 시험체 B2의 사전 균열은 기본 시험체 B1의 공칭 휨 강도에 대한 이론식을 기초하여 계산된 극한하중 $P_u = 3.959 \text{ ton}$ 의 약 40 %인 1.5 ton의 하중을 재하속도 50 kgf/s로 부재의 중앙에 3회 반복 재하하여 발생시켰다.

3. FRP 보강 부재의 휨 해석

3.1 개요

이 장에서 전개되는 부재의 역학적 해석은 다음과 같은 기본 가정에 기초를 둔다.^(1,3,5)

- (1) FRP와 콘크리트 인장면 사이의 부착은 완전하다.
- (2) 변형 전의 평면단면은 변형 후에도 평면을 유지한다.
- (3) 인장철근, FRP의 응력은 응력-변형을 관계를 이용하여 계산한 변형률로부터 직접 계산할 수 있다.
- (4) 인장철근과 콘크리트는 경계면에서 완전히 부착된 것으로 가정한다.
- (5) 인장철근의 응력-변형을 관계는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 탄성-소성인 것으로 가정한다.
- (6) Fig. 4에서 콘크리트의 극한 압축변형률 ϵ_{cu} 는 0.003이다.
- (7) FRP의 응력-변형을 관계는 Fig. 5에 보인 것처럼 파괴점까지 선형탄성으로 가정한다.

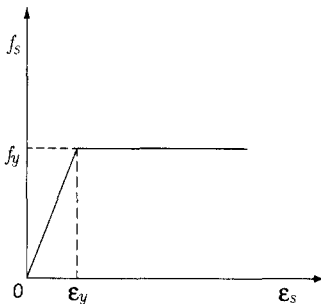


Fig. 3 Stress-Strain diagram for reinforcing steel

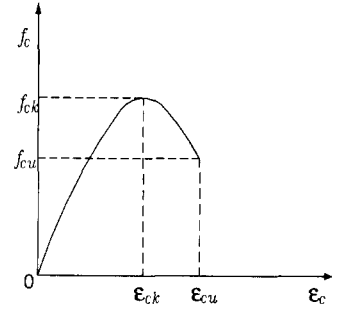


Fig. 4 Stress-Strain diagram for concrete

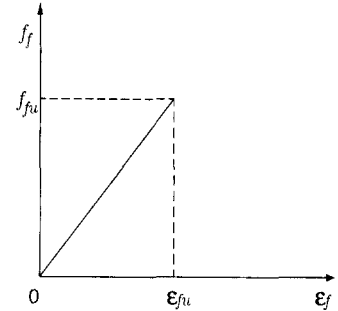


Fig. 5 Stress-Strain diagram for FRP

여기서

- d_f : 압축측 상단에서 FRP 도심까지 거리
- h : 콘크리트 부재의 높이
- d_s : 압축측 상단에서 인장철근 도심까지 거리
- b : 콘크리트 부재의 폭
- x : 압축측 상단에서 중립축까지 거리
- a : $\beta_1 x$
- β_1 : $0.425 (f_{ck} \leq 280 \text{ kgf/cm}^2)$
- ϵ_{cu} : 콘크리트의 극한 압축변형률
- ϵ_c : 콘크리트의 압축변형률
- ϵ_s : 인장철근의 변형률
- ϵ_f : FRP의 변형률
- f_{ck} : 콘크리트의 28일 압축강도
- f_s : 인장철근의 응력
- f_f : FRP의 응력
- A_s : 인장철근의 단면적
- A_f : FRP의 단면적

E_c : 콘크리트의 탄성계수

E_s : 인장철근의 탄성계수

E_f : FRP의 탄성계수

FRP로 보강한 휨 부재의 극한강도는 일반적으로 콘크리트의 압축파괴 또는 FRP의 휨 인장파괴로 지배된다. 공칭강도는 이러한 파괴가 인장철근 항복 전에 발생했는지 또는 인장철근의 항복 후에 발생했는지에 따라서 영향을 받게 된다⁽⁴⁾.

다음의 항들은 FRP 보강 부재의 발생 가능한 파괴형태를 요약한 것이다.

- (1) 인장철근 항복 전의 콘크리트 압축파괴
- (2) 인장철근 항복 전의 FRP 휨 인장파괴
- (3) 인장철근 항복 후의 콘크리트 압축파괴
- (4) 인장철근 항복 후의 FRP 휨 인장파괴

이러한 파괴형태 이외에도 국부적으로 콘크리트와 FRP의 박리에 의하여 조기에 파괴되는 형태도 있을 수 있다.

3.2 극한상태에서 단면해석

FRP 보강 부재의 해석은 변형률 적합성, 구성재료의 합응력 평형 등을 고려한다.

콘크리트의 비선형응력 관계는 계산상의 편리를 위하여 Whitney의 응력사각형으로 대체한다.

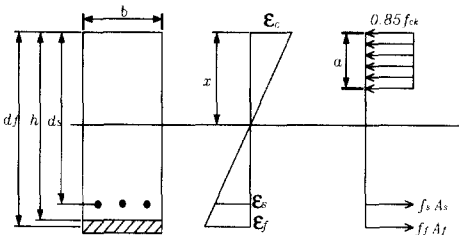


Fig. 6 Stress - Strain distributions in the cross section

부재의 파괴가 콘크리트 압축파괴로 지배된다면, 파괴시의 콘크리트 변형률은 콘크리트의 극한 변형률 ϵ_{cu} 가 된다.

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu} \quad (1)$$

인장철근과 FRP의 변형률 크기는 이미 알고 있는 콘크리트의 변형률 값과 시산법으로 계산된 중립축 위치를 근거로 해서 결정할 수 있다.

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_s - x}{x} \right) \quad (2)$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - x}{x} \right) \quad (3)$$

인장철근의 응력은 항복점 이하 변형률에 대해서는 변형률에 비례하며, 항복점을 지난 변형률에 대해서는 항복응력을 취해야 한다. 또한, FRP는 선형-탄성적으로 파괴된다고 가정한다.

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \quad (4)$$

$$f_f = E_f \epsilon_f \quad (5)$$

중립축의 위치 x 값은 추정된 중립축의 위치 x 값과 내부 합응력의 평형조건을 이용한 식(6)으로 구한 값이 같을 때까지 반복 계산한다.

$$x = \frac{A_s f_s + A_f f_f}{0.85 f_{ck} \beta_1 b} \quad (6)$$

식(6)으로 계산한 중립축의 위치 x 값을 이용하여, 콘크리트의 압축파괴로 지배되는 FRP 보강 부재의 공칭강도 일반식은 다음과 같다.

$$M_n = A_s f_s \left(d_s - \frac{\beta_1 x}{2} \right) + A_f f_f \left(d_f - \frac{\beta_1 x}{2} \right) \quad (7)$$

3.3 탄성상태에서 단면해석

FRP 보강 부재의 응력 해석은 부재 단면의 사용하중상태에서 균열단면의 중립축 위치를 결정하고(모든 재료는 선형-탄성적이라고 가정하여), 사용하중모멘트를 근거로 하여 각 재료의 응력을 계산한 것이다. 기존의 철근콘크리트 단면에 대한 것과 마찬가지로, 사용하중상태에서 중립축 위치는 환산단면의 단면 1 차 모멘트를 취함으로써 계산할 수 있다. FRP의 환산단면적은 콘크리트에 대한 FRP의 탄성계수 비를 FRP 면적에 곱해줌으로써 얻어진다. 각 재료의 응력은 식(8)부터 식(13)으로 계산된다.

$$f_s^I = n_s \frac{M_w(d_s - x^I)}{I_g} \quad (8)$$

$$f_s^{II} = n_s \frac{M_w(d_s - x^{II})}{I_{cr}} \quad (9)$$

$$f_c^I = \frac{M_w x^I}{I_g} \quad (10)$$

$$f_c^{II} = \frac{M_w x^{II}}{I_{cr}} \quad (11)$$

$$f_f^I = n_f \frac{M_w(d_f - x^I)}{I_g} \quad (12)$$

$$f_f^{II} = n_f \frac{M_w(d_f - x^{II})}{I_{cr}} \quad (13)$$

여기서,

f_s^I : 비균열 단면의 인장철근 응력

f_s^{II} : 균열 단면의 인장철근 응력

f_c^I : 비균열 단면의 콘크리트 압축응력

f_c^{II} : 균열 단면의 콘크리트 압축응력

f_f^I : 비균열 단면의 FRP 인장응력

f_f^{II} : 균열 단면의 FRP 인장응력

n_s : E_s / E_c

n_f : E_f / E_c

x^I : 비균열 단면의 압축축 상단에서 도심축까지의 거리

x^{II} : 균열 단면의 압축축 상단에서 도심축까지의 거리

M_w : 사용하중 모멘트

또한, FRP 보강 구조물의 처짐식은 콘크리트 표준시방서의 식을 사용하였으며, 콘크리트 균열 전과 균열 후의 2 개의 구간으로 나누어 계산하였다. 먼저 콘크리트의 균열 전에는 비균열 단면의 단면 2차 모멘트를 이용하여 계산한다.

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + \left(\frac{h}{2} - x^I\right)^2 bh + (n_s - 1)A_s(d_s - x^I)^2 + n_f A_f(d_f - x^I)^2 \quad (14)$$

콘크리트의 균열 후에는 비균열 단면의 단면 2차 모멘트 I_g 와 균열 단면의 단면 2차 모멘트 I_{cr} 을 이용하여 계산한 I_e 를 이용한다.

$$I_{cr} = \frac{b x^{II3}}{3} + n_s A_s(d_s - x^{II})^2 + n_f A_f(d_f - x^{II})^2 \quad (15)$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (16)$$

여기서,

M_a : 단면 2차 모멘트를 계산할 곳의 하중 상태에 따른 부재의 최대 모멘트

M_{cr} : 균열 모멘트 = $\frac{f_{rc} I_g}{y_t}$

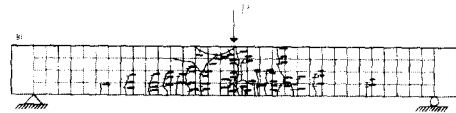
f_{rc} : 휨 인장 파괴계수

y_t : 단면 도심으로부터 인장연단까지 거리

4. 실험결과 및 분석

4.1 극한하중 및 파괴형태

본 연구의 AFRP 보강 시험체는 압축축 콘크리트의 파괴에 의한 취성파괴가 발생하였다. 이러한 취성파괴는 인장축의 과보강으로 인한 압축축 콘크리트의 파괴가 주원인이 되며, Fig. 7(a)~(f)는 시험체에 콘크리트의 압축파괴가 일어난 후에도 하중을 계속 가하여 인장축 FRP의 박리가 발생하고 난 후에 FRP가 파단된 것을 그림으로 나타낸 것이다.



(a) B1

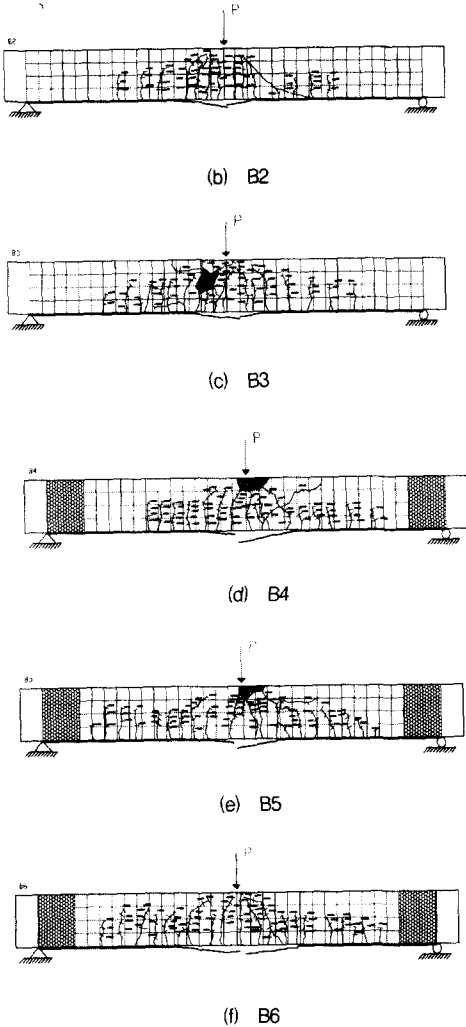


Fig. 7 Crack pattern of specimen

Table 3은 3 장에서 기술한 공칭 휨 강도에 대한 이론식을 기초하여 계산된 극한하중 cal. P_u 와 실험을 통하여 얻은 극한하중 mes. P_u , 기본 시험체 B1의 극한하중 측정값에 대한 FRP를 보강한 시험체 B2~B6의 극한하중 측정값의 비율 R과 각 시험체의 파괴형태를 나타낸 것이다. Table 3에 나타낸 것처럼 FRP를 보강한 시험체 B2~B6의 극한하중 측정값은 기본 시험체 B1의 극한하중 측정값에 비해서 50%~100%의 큰 값을 나타내고 있다. 특히, cal. P_u 와 mes. P_u 는 일치하고 있지 않은데, 이것은 극

한 강도 이론에 의한 공칭 휨 강도 계산식에 콘크리트 응력 사각형 등과 같은 가정값들을 포함하고 있기 때문에 cal. P_u 값과 mes. P_u 값이 일치하지 않는 것으로 보인다. 그리고, FRP로 보강한 시험체의 파괴는 콘크리트의 휨 압축 파괴로 지배되며, FRP의 변형률이 극한 변형률에 이르기 전에 부재가 파괴되었다.

Table 3 Ultimate load and failure mode

	mes. P_u	cal. P_u	R	Failure Mode
B1	4.032	3.959	1.00	Tension
B2	6.057	5.666	1.502	Compression
B3	6.562	5.666	1.627	Compression
B4	6.687	5.666	1.658	Compression
B5	7.713	6.647	1.913	Compression
B6	8.091	6.647	2.007	Compression

여기서 R은 시험체 B1의 극한하중 측정값에 대한 나머지 시험체의 극한 하중 측정값 비율이다.

4.2 하중 - 처짐 관계

시험체의 처짐량 측정을 위하여 6개의 변위계(LVDT)를 이용하였으며, Fig. 8은 변위계를 이용하여 측정된 시험체 중앙점에서의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 시간길이가 2.5 m인 본 실험의 시험체에 대하여, 콘크리트 표준시방서에서 규정하고 있는 한계 처짐량은 $L/360 = 2500/360 = 6.944$ mm이다. FRP 보강 부재는 인장철근의 항복 후, 압축측 콘크리트가 파괴되며 부재는 파괴상태에 들어가게 된다. Fig. 8에서 나타낸 것과 같이 콘크리트 표준시방서의 처짐식을 이용하여 계산된 3개의 이론값들은 콘크리트의 균열 전과 균열 후의 2개 부분으로 나누어져 있으며, 인장철근 항복 전과 사용하중상태에서는 FRP 보강 부재의 실제 처짐값과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서, 사용하중상태에서 부재의 거동을 예측하고자하는 본 연구의 목적에 적합함을 알 수 있다.

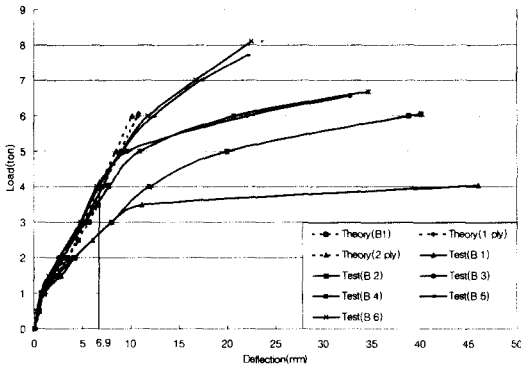


Fig. 8 Load vs. deflection curve

또한, 시험체의 한계 처짐량 6.944 mm에 해당하는 하중에 대하여 실험변수에 따라 측정된 실험값들을 비교해보면, 사전 균열 유무에 따른 시험체 B2와 B3에서는 시험체 B3의 하중이 B2에 비하여 19% 크다. 이것은 시험체 B2가 사전 균열 때문에 초기 휨 강성이 저하되었기 때문인 것으로 보인다. 정착부 보강유무에 따른 시험체 B3과 B4에서는 B4의 하중이 B3의 하중에 비하여 3.8% 크지만 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. AFRP 보강량이 다른 경우인 시험체 B3과 B6에서는 B6의 하중이 B3의 하중에 비하여 10.5% 크지만, AFRP 보강량의 증가에 비하여 초기 휨 강성은 그다지 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이것은 인장철근의 인장력 부담량이 AFRP 보강량이 증가하여도 크게 감소되지 않기 때문이다. 그리고, AFRP 보강길이 변화에 따른 시험체 B5와 B6에서는 시험체 B6의 하중이 B5의 하중에 비하여 4.2% 크지만, 두 시험체 사이의 하중크기는 큰 차이가 없다. 이것은 AFRP 서로간의 부착강도가 최소 500 kgf/cm² 정도로, AFRP와 콘크리트와 부착강도 100 kgf/cm²보다 크기 때문이다. 따라서 추가 보강되는 AFRP는 보강을 필요로 하는 부분에만 보강하여도 보강효과는 충분하다고 볼 수 있다.

Table 4는 한계 처짐량 6.944 mm에 해당하는 각 시험체의 하중 P_w 와 극한하중 P_u , 한계 처짐량에 해당하는 하중에 대한 극한하중의 비율 P_u/P_w , 기본 시험체 B1의 한계 처짐량에 해당

하는 하중에 대한 각 시험체의 한계 처짐량에 해당하는 하중의 비율 γ_w , 기본 시험체 B1의 극한하중 실험값에 대한 각 시험체의 극한하중 값의 비율 γ_u 을 나타낸 것이다.

Table 4 Service load and ultimate load (unit : ton)

	P_w	γ_w	P_u	γ_u	P_u / P_w
B1	2.561	1.000	4.032	1.000	1.574
B2	2.623	1.024	6.057	1.502	2.309
B3	3.128	1.221	6.562	1.627	2.098
B4	3.246	1.267	6.687	1.658	2.060
B5	3.317	1.295	7.713	1.913	2.325
B6	3.458	1.350	8.091	2.007	2.340

Table 4에서 나타낸 것과 같이 한계 처짐량에 대한 각 시험체의 하중은 AFRP의 보강량을 달리하여도 큰 차이를 보이지 않으나, 극한하중은 기본 시험체 B1에 비하여 AFRP를 한 겹 보강한 시험체 B2, B3, B4에서는 50%~60%가 증가하고, AFRP를 두 겹 보강한 시험체 B5, B6에서는 90%~100% 까지 증가하는 것으로 나타났다. 즉, AFRP의 보강량 차이는 초기 휨 상태에서는 큰 영향을 미치지 않으나 극한상태에서는 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Table 5는 시험체의 강성지수 K_B 와 연성지수 μ_B 를 나타낸 것이다. 여기서, χ_B 는 K_B/K_{B1} , ϕ_B 는 μ_B/μ_{B1} 이다^(2,6). 시험체의 강성도는 하중-처짐 곡선에서 콘크리트 균열하중 P_{cr} 과 콘크리트 균열하중에서의 처짐량 δ_{cr} , 인장철근의 항복하중 P_y 과 인장철근 항복하중에서 처짐량 δ_y 를 이용한 강성지수 $K = (P_y - P_{cr}) / (\delta_y - \delta_{cr})$ 로 나타낸다. 또한, 각 시험체의 연성도는 하중-처짐 곡선에서 시험체 최대하중에서의 변위 δ_{max} 와 인장철근 항복하중에서의 변위 δ_y 를 이용한 연성지수 $\mu = \delta_{max} / \delta_y$ 로 나타낸다.

Table 5 Flexural stiffness index and ductility index

	$K_B(\text{kg/mm})$	χ_B	$\mu_B(\text{mm/mm})$	ϕ_B
B1	213.671	1.000	3.998	1.000
B2	237.247	1.110	2.677	0.670
B3	310.146	1.452	2.651	0.663
B4	312.878	1.464	2.644	0.661
B5	325.200	1.522	2.307	0.577
B6	357.200	1.672	2.265	0.567

Table 5에서 AFRP로 보강한 시험체는 기본 시험체 B1에 비하여 강성지수는 10%~70% 증가하고, 연성지수는 최대 50%가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, AFRP로 보강한 시험체는 기본 시험체 B1에 비하여 파괴가 취성적임을 알 수 있다.

4.3 하중 - 인장철근 변형률 관계

Fig. 9는 시험체의 하중-인장철근 변형률 곡선을 나타낸 것이다. AFRP 보강 시험체 및 기본 시험체 B1의 사용하중은 인장철근의 항복하중보다 작아야 부재의 사용성에 문제가 없게 된다. 즉, 사용하중상태에서 인장철근 변형률은 탄성범위 내에 있어야 한다. 이때, 사용성을 검토하기 위한 사용하중 결정방법으로는 한계 처짐량에 해당하는 하중 P_w^I 과 $P_u/1.8$ 로 계산된 하중 P_w^II , $f_s=0.6 f_y$ 에 해당하는 하중 P_w^III 등의 세 가지 방법을 고려할 수 있다.

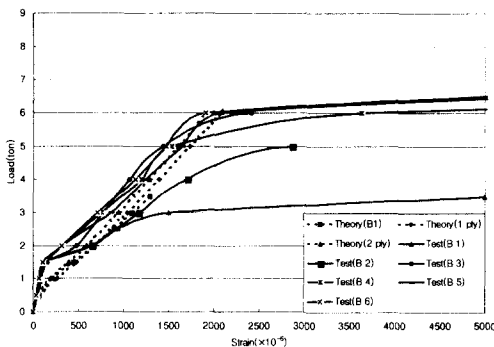


Fig. 9 Load vs. steel - strain curve

Fig. 9의 하중-인장철근 변형률 곡선에서 나타낸 것과 같이 시험체의 인장철근 항복 변형률 $\epsilon_y = 1750 \times 10^{-6}$ 이며, 세 가지 하중에 대한 인장철근 변형률이 탄성범위 내에 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 사용하중상태와 인장철근의 항복 전까지 극한강도이론에 의한 응력식을 이용하여 계산된 인장철근의 변형률은 실제 측정된 실험값과 근사함을 알 수 있다.

Table 6 Service load and steel strain (unit : 10^{-6})

	P_w^I	ϵ_w^I	P_w^II	ϵ_w^II	P_w^III	ϵ_w^III
B1	2.561	1052.9	2.240	855.5	2.482	1050.0
B2	2.623	986.6	3.365	1377.3	2.504	
B3	2.871	951.2	3.646	1212.2	3.724	
B4	3.246	982.3	3.715	1190.6	3.547	
B5	3.359	701.1	4.285	1197.5	3.482	
B6	3.458	818.9	4.495	1244.0	3.815	

Table 6은 세 가지 경우의 하중과 인장철근 변형률을 나타낸 것으로서, AFRP를 보강하지 않은 시험체 B1을 제외한 나머지 시험체에서는 세 가지 하중 중에서 $P_u/1.8$ 의 하중 크기가 가장 큰 값을 가지게 됨을 알 수 있다

Table 7 Tensile steel stress for service load

	$P_{w1}^II(\text{ton})$	$f_s(\text{ kgf/cm}^2)$	ζ
B1	2.240	1826.8	1.000
B2		1745.4	0.956
B3		1406.6	0.770
B4		1227.5	0.672
B5		1067.1	0.584
B6		1020.4	0.559

P_{w1}^II : 시험체 B1의 $P_u/1.8$ 에 해당하는 하중
 ζ : P_{w1}^II 에서 시험체 B1의 인장철근 변형률 / 시험체의 인장철근 변형률의 비율

Table 7은 기본 시험체 B1의 극한하중 P_u

를 1.8로 나눈 하중에서 각 시험체의 인장철근
 응력 f_s 을 나타낸 것이다. 기본 시험체 B1의 인장
 철근 응력에 비하여 AFRP를 한 겹 보강한 시험
 체 B3과 B4의 인장철근 응력은 약 30%, 두 겹
 보강한 시험체 B5와 B6의 인장철근 응력은 약
 45%정도가 감소하는 것으로 나타났다. 이것은
 AFRP를 보강함으로써 인장철근과 AFRP가 하
 중을 분담하여 인장철근의 응력이 감소하기 때문
 인 것으로 보인다.

4.4 하중 - AFRP 변형률 관계

Fig. 10은 시험체의 하중-AFRP 변형률 곡선
 을 나타낸 것이며, 이 곡선에서, AFRP로 보강한
 시험체들은 인장철근의 항복하고 압축측 콘크리
 트파괴가 일어난 후에는 AFRP의 변형률이 급격
 히 증가함을 알 수 있으며, 극한하중상태에서
 는 부재가 취성적으로 파괴됨을 알 수 있다.

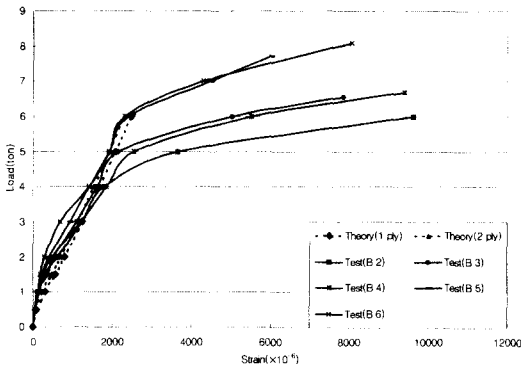


Fig. 10 Load vs. AFRP - Strain Curve

또한, Fig. 10으로부터 AFRP로 보강된 시험
 체의 하중-AFRP 변형률 곡선은 3개의 서로 다
 른 기울기를 가진다는 것을 알 수 있다. 첫 번째
 기울기는 AFRP로 보강한 시험체의 인장측 콘크
 리트에 균열이 생기기 전까지의 구간으로, 구성재
 료 모두가 인장력을 부담하며, 인장철근이나
 AFRP의 인장력 부담량은 미미하다. 두 번째 기
 울기는 인장측 콘크리트의 균열하중으로부터 인
 장철근 항복하중까지의 구간으로 첫 번째 기울기

보다는 기울기가 완만하다. 이 구간에서는 하중이
 증가함에 따라 인장철근과 AFRP의 응력분담의
 재분배가 일어난다. 세 번째 기울기는 인장철근의
 항복하중으로부터 시험체 극한하중까지의 구간으
 로, 이 구간에서는 AFRP의 인장력 부담량이 증
 가하게 된다. 그러나, 극한하중에서 압축측의 콘
 크리트 변형률이 극한값에 먼저 이르게 되어 콘
 크리트의 압축파괴가 일어나게 됨에 따라 AFRP
 의 변형률은 극한 변형률 $\epsilon_{fu} = 24,000 \times 10^{-6}$
 에는 미치지 못하게된다.

Table 8은 사용하중 및 극한하중상태에서 각
 시험체의 인장철근과 AFRP의 인장력 분담량을
 알아보기 위하여 인장철근응력 f_s 과 인장력 T_s ,
 AFRP의 인장응력 f_f , 인장력 T_f 을 나타낸 것이
 다. Table 8에서 보는 바와 같이 사용하중상태에

Table 8 Tensile stress and tensile force

P	f_i (kgf/cm ²)		T (ton)		$\frac{T_f}{T_s + T_f}$	
	f_s	f_f	T_s	T_f		
B1	$0.6 f_y$	2100.0	--	12.5	--	--
	$P_u/1.8$	1668.2	--	9.9	--	--
	P_u	3500.0	--	20.9	--	--
B2	$0.6 f_y$	2100.0	1610.7	12.5	1.1	0.08
	$P_u/1.8$	2092.3	1578.4	12.5	1.0	0.07
	P_u	3500.0	11481	20.9	7.6	0.27
B3	$0.6 f_y$	2100.0	1678.6	12.5	1.1	0.08
	$P_u/1.8$	2274.9	1765.7	15.3	1.2	0.07
	P_u	3500.0	8986.5	20.9	5.9	0.22
B4	$0.6 f_y$	2100.0	1726.4	12.5	1.1	0.08
	$P_u/1.8$	2326.7	1843.8	13.9	1.2	0.08
	P_u	3500.0	9161.5	20.9	6.0	0.22
B5	$0.6 f_y$	2100.0	1777.4	12.5	2.3	0.16
	$P_u/1.8$	2442.8	2148.7	14.6	2.8	0.16
	P_u	3500.0	8897.6	20.9	11.7	0.36
B6	$0.6 f_y$	2100.0	1845.9	12.5	2.4	0.16
	$P_u/1.8$	2433.7	2069.3	13.9	2.7	0.16
	P_u	3500.0	9638.2	20.9	12.7	0.38

서는 하중에 의한 인장력의 대부분을 인장철근이 부담하며, 인장철근의 항복하중에서 극한하중까지는 AFRP의 인장력 분담량이 점차 증가하게 되지만, AFRP의 박리로 인하여 AFRP가 극한 변형률에 이르기 전에 시험체는 취성과 파괴가 일어나게 된다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

AFRP를 보강한 시험체의 휨 보강효과를 평가하기 위하여 AFRP의 보강 유무, 사전 균열의 유무, 정착부 보강의 유무, AFRP의 보강량에 따라 극한강도 뿐만 아니라, 사용하중상태에서의 인장철근의 변형률, AFRP의 변형률, 시험체의 처짐 등을 평가하였다. 본 실험을 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) AFRP로 보강한 시험체의 한계 처짐량에 해당하는 하중은 기본 시험체의 하중에 비하여 20%~35%가 크고, 극한하중은 기본 시험체의 극한하중에 비하여 50%~100%가 크다. 따라서, AFRP 보강은 시험체의 초기 휨 상태에서 보다 극한상태에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.
- 2) 시험체 B3의 한계 처짐량에 해당하는 하중은 시험체 B2의 하중에 비하여 19%가 크며, 극한하중은 8.3%가 크다. 따라서, 시험체 B2는 사전 균열로 인하여 초기 휨 강성의 차이는 있으나, 극한강도 면에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.
- 3) 시험체 B4와 시험체 B3은 한계 처짐량에 해당하는 하중 및 극한하중의 차이가 3% 정도로 차이가 미미하다. 따라서, AFRP의 보강길이를 지점부까지한 경우에는 지점부의 AFRP 박리를 억제하게 됨으로써 정착부를 보강한 경우와 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다.
- 4) 시험체 B6과 시험체 B5에서는 두 시험체의 한계 처짐량에 해당하는 하중과 극한하중의 차이가 4% 정도로 큰 차이가 없다. 이것은 AFRP 서로간의 부착강도가 AFRP

와 콘크리트와의 부착강도 보다 크기 때문에 지점부까지 AFRP를 보강하지 않고 보강을 필요로 하는 부분에만 AFRP를 추가 보강하여도 보강효과는 충분하기 때문이라고 볼 수 있다.

- 5) AFRP를 보강한 시험체는 기본 시험체에 비하여 강성계수는 보강량에 따라 10% ~ 70%가 증가하고, 연성계수는 최대 50%가 감소하는 것으로 나타났다.
- 6) AFRP의 보강량이 많아짐에 따라 균열 발생 범위는 넓어지고, 균열 수는 증가하여 균열 분산 효과가 있음을 알 수 있다.
- 7) AFRP 보강 시험체의 사용하중 결정을 위한 세 가지의 방법 중에서 극한하중을 안전율로 나눈 경우의 하중 크기가 가장 크게 나타났다. 따라서, 세 가지 경우의 사용하중 결정방법 중에서 극한하중을 안전율로 나눈 경우를 사용하중으로 결정하는 것은 바람직 하지 않은 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 명지대학교와 (주)청조화성의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Marco Arduini and Antonio Nanni, "Behavior of Precracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets.", *Journal of Composites for Constuction*, Vol 1, No. 2, May, 1997, pp. 63~70.
2. M. J. Chajes, T. A. Thomson, "Reinforcement of Concrete Structure Using Externally Bonded Composite Materials.", *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Vol. 1, 1997, 10, pp.501~508.
3. Antonio Nanni, "Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement.", *The Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No.11, November, 1993, pp. 3344~3358.
4. Bhagwan D. Agarwal and Lawrence J.

- Broutman, "Analysis and Performance of Fiber Composites.", John Wiley & sons, Inc, pp. 13~35.
5. Marco Arduini, Angelo Di Tommaso, and Antonio Nanni, "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams.", ACI Structural Journal, Vol. 94, No.4, July -August 1997, pp. 363~370.
6. H. Ichimasu, et al, "RC Slabs Strengthened by Bonded Carbon FRP Plates : Part 1 - Laboratory Study.", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol.1, 1997, 10, pp. 933~955.

요 약

복합재란 두 가지 이상의 뚜렷한 재료 특성을 가진 재료들로 구성된 새로운 재료를 말한다.

최근에 기존 구조물의 설계하중 증가, 사용목적의 변경, 붕괴 문제, 설계와 시공상의 문제로 인한 구조물의 보수·보강 필요성은 더욱 증대하고 있다. 따라서, 구조물의 보수·보강에 많은 장점을 가지고 있는 복합재를 이용한 구조물의 보수·보강에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 AFRP를 외부 부착한 철근콘크리트 슬래브의 휨 거동에 대하여 연구하였으며, 시험체의 인장철근 변형률, 처짐, 파괴형태 등을 측정하였다. 또한, AFRP의 보강형태와 보강 유무에 따른 휨 거동의 차이를 비교 검토해 보았다.

(접수일자 : 2000. 2. 22)