

탄소섬유보강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 정착길이 특성

Characteristics of Anchorage Length for Reinforced Concrete Beam Strengthened by CFRP Plate

한상훈* 최만용** 조홍동*** 박중열**** 황선일**** 권용길****
Han, Sang Hoon Choi, Mhan Yong Cho, Hong Dong Park, Jung Yeol Huang, Seon Il Kwon, Yong Gil

ABSTRACT

This paper deals with the flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP plate and the estimation on anchorage length of CFRP plate. Experimental variables included concrete strength, reinforcement ratio, cover thickness of concrete and length ratio of CFRP plate for a pure span. A failure load, failure mode, deflection and strain response at different distances from a cut-off point of CFRP plate were observed and anchorage length was determined through strain distribution of CFRP plate. Herein, anchorage length is defined the length between CFRP plate end and the beginning point of full composite behavior. Also, the anchorage length observed from the experiment was compared with Nguyen's equation and BS specification.

1. 서 론

노후화된 구조물의 증가로 인해 다양한 보강공법 및 보강재료가 구조물에 적용되고 있다. 특히 강판은 보강에 따른 휨성능 개선효과가 우수하여 지난 20여 년간 사용되어 왔으나 재료적인 측면과 시공적인 측면에서 여러 가지 문제점이 제기되어 탄소섬유 및 유리섬유 등과 같은 고탄성 신소재로 대체되고 있는 추세에 있다. 이들 신소재를 이용한 보강을 통해 상당한 강도, 강성 증진 효과를 기대할 수 있지만, 보강판이 콘크리트 모체로부터 박리됨으로써 보강된 구조물의 취성적인 파괴를 유발할 수 있다. 이는 보강판 단부에서의 응력집중이나 콘크리트-접착제-보강판의 서로 다른 재료의 구성으로 인해 불충분한 합성거동이 일어나기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 철근콘크리트 보를 탄소섬유보강판(Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate, 이하 CFRP)으로 휨보강한 경우 CFRP의 정착길이 개념을 확립하고, 실험결과를 기존의 해석적인 정착길이 산정 결과와 비교함으로써 CFRP의 조기박리 파괴를 제어하기 위한 자료를 제시하고자 하는데 연구의 목적이 있다.

* 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

** 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹 책임연구원

*** 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 연구원

**** 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

2. 휨보강된 RC보에서 CFRP의 정착길이

최근 철근콘크리트 구조물에 CFRP를 보강하는 경우 정착길이가 관련하여 계면응력 해석이론에 기초한 Nguyen의 제안식과 영국 표준식이 제안되었다. 본 연구에서는 이들 제안식에 의한 결과와 실험 결과를 비교 분석하는데 연구의 목적이 있다.

2.1 Nguyen의 제안식

Nguyen¹⁾ 등은 CFRP로 보강한 철근콘크리트 보의 파괴모드와 합성거동 그리고 완전합성거동이 이루어지는 위치를 연구하였다. 실험적인 연구를 통해 단부박리파괴시 콘크리트와 CFRP의 합성거동은 3개의 다른 영역 즉, 응력이 감소되는 영역, 정착발현 영역, 완전합성거동 영역으로 구분하였다. 이와 같은 구분을 통하여 정착길이 및 임계변형률(ϵ_{pl})을 결정하였으며, 이들 정착길이가 임계변형률에 의해 단부박리파괴시 파괴하중이 예측될 수 있다고 제안하였다. 정착길이(l_p)는 Roberts²⁾의 계면응력해석이론에 기초하여 식(1)과 같이 나타내었다.

$$l_p = \frac{4.6l}{\lambda} \quad (1)$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_p t_p} \frac{G_a G_c}{G_c t_a + G_a c_m} \quad (2)$$

여기서, G_a 는 접착제의 탄성계수, t_a 는 접착층의 두께, c_m 은 콘크리트의 피복두께, G_c 는 콘크리트 균열발생시 콘크리트의 전단탄성계수, t_p 는 보강판의 두께 그리고 E_p 는 보강판의 탄성계수를 나타낸다.

그러나, 실제 정착길이 l_{dev} 는 콘크리트의 피복두께(d_p)에 따른 영향과 보이론의 적용을 고려하여 식(3)과 같이 제안되었다.

$$l_{dev} = c_m + \frac{d_p}{2} + \frac{4.6l}{\lambda} \quad (3)$$

2.2 영국(BS)규준

BS 규준³⁾에서는 다양한 실험적인 결과를 통해 다음과 같은 내용을 조기파괴 모드 특히 단부박리파괴에 대한 제어 방법으로 제시하고 있다. 첫째, 탄성이론으로부터 계산된 보강판과 콘크리트 사이의 전단응력이 0.8 N/mm^2 을 넘지 않도록 제한하고 있다. 또한, 이론적으로 더 이상 요구되지 않는 위치 이상까지 보강판을 확장하여 정착하도록 제안하고 있다. 이와 같이 보강판의 추가적인 정착길이($l_{i,max}$)는 Fig. 1에서와 같은 부착파괴력 F_k 와 정착길이 l_i 의 특성에 따라 식(4)와 같이 계산된다.

$$l_{i,max} = 0.7 \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_{cm}}} \quad (4)$$

여기서, E_p 는 보강판의 탄성계수, f_{cm} 은 콘크리트의 인장강도 ($=0.18(f_w)^{2/3}$), f_w 는 콘크리트의 압축강도 그리고 t_p 는 보강판의 두께를 나타낸다.

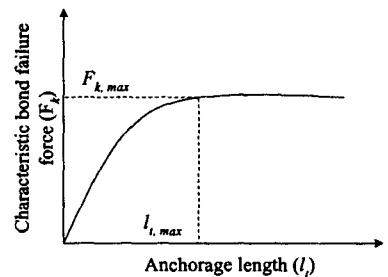


Fig. 1 Characteristic bond failure force vs anchorage length

3. CFRP의 정착길이 산정에 관한 실험 및 고찰

3.1 실험계획

본 연구에서는 콘크리트의 강도, 보강판의 길이, 철근비 그리고 콘크리트의 피복두께를 변수로 하여 각 변수에 따른 보강효과를 관찰하였다. 또한 CFRP에서의 변형을 분포를 분석하여 합성거동을 관찰하였으며, CFRP의 정착길이를 제시하였다. 이를 위해 실험체는 기준실험체를 포함하여 총 10개를 제작하였으며, 각 실험변수 및 실험체는 Table 1과 같다.

Table 1 Test variables

Series	Specimen	Strength of concrete(kgf/cm ²)	Reinforcing bar	Strengthening length	Thickness of concrete cover(cm)
CB	2B16	271	D16	-	3
1B	1B16-8L3	161	D16	0.8L	3
	1B16-8L4	161	D16	0.8L	4
2B	2B16-7L3	271	D16	0.7L	3
	2B16-8L3	271	D16	0.8L	3
	2B16-8.5L3	271	D16	0.85L	3
	2B16-9L3	271	D16	0.9L	3
3B	3B13-8L3	328	D13	0.8L	3
	3B16-8L3	328	D16	0.8L	3
	3B19-8L3	328	D19	0.8L	3

3.2 사용재료

CFRP에 의해 보강된 실험체의 휨거동을 분석하기 위해 목표강도에 따른 배합설계를 수행하여 콘크리트를 타설하였으며, 원주형 공시체를 제작하여 재령 28일 후에 콘크리트 압축강도를 측정하였다. 또한 보강을 위해 사용된 CFRP는 Swiss S사에서 개발한 S&P Laminate (150/2000) 제품을 사용하였다. 이와 같이 사용된 재료에 대한 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2 Material properties

	Concrete	Reinforcing bar(KS D3504 SD30A)				CFRP
		D10	D13	D16	D19	
Modulus of elasticity (kgf/cm ²)	-	2×10 ⁶	2×10 ⁶	2×10 ⁶	2×10 ⁶	1.648×10 ⁶
Yield strength (kgf/cm ²)	-	4,165	4,080	3,710	4,135	-
Ultimate[Tensile] strength (kgf/cm ²)	161, 271, 328	5,805	5,885	5,455	5,835	27,500~30,600

3.3 실험체 제작 및 실험방법

본 연구에서 사용된 실험체는 Fig. 2와 같이 단철근 직사각형 보로 설계되며, 전단파괴를 방지하기 위해 10cm 간격으로 전단철근을 충분히 배근하였다. 하중재하는 하중제어(load control) 방법에 의해 4점 재하를 수행하였다. 하중재하시 부재 중앙부에서의 처짐, 인장철근 및 압축철근의 변형을, 그리고 각 위치에서의 CFRP 변형을 측정하였으며, 균열진전상황을 관찰하였다.

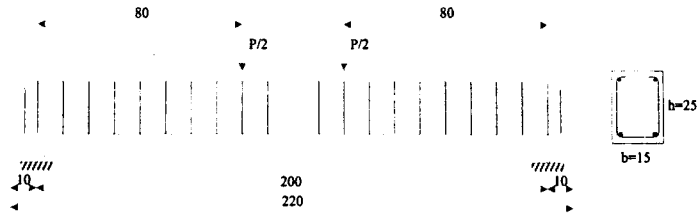


Fig. 2 Reinforcement detail and section dimension of beam (unit : cm)

3.4 실험결과 및 고찰

기준 실험체 및 보강된 실험체에 대한 실험 결과는 Table 3과 같다. 각각의 실험 변수에 따른 파괴 하중, 파괴형태, 처짐 그리고 변형률 등의 비교를 통해 보강효과를 분석하였다. 또한 극한상태에 대한 하중증가율은 기준실험체의 예측된 하중을 기준으로 한 것이다.

Table 3 Experimental results

Specimen	Yielding of rebar		Ultimate state			Ductility* (μ)	Failure mode
	Load (tonf)	Deflection (δ_y , mm)	Load (tonf)	ratio of increase(%)	Deflection (δ_u , mm)		
2B16	5.85	6.02	7.03	-	31.90	5.30	Flexural failure
1B16-8L3	8.96	8.17	10.33	40	10.74	1.32	Interface debonding failure
1B16-8L4	7.68	7.77	8.48	22	9.61	1.24	Interface debonding failure
2B16-7L3	9.40	7.40	10.25	39	8.94	1.21	Interface debonding failure
2B16-8L3	9.66	7.10	11.28	53	9.61	1.35	Interface debonding failure
2B16-8.5L3	9.46	7.56	12.47	69	13.09	1.73	Ripping - off failure
2B16-9L3	9.18	6.26	12.79	73	12.18	1.95	Ripping - off failure
3B13-8L3	8.81	7.26	10.48	107	10.54	1.45	Ripping - off failure
3B16-8L3	8.28	5.82	12.57	66	12.79	2.20	Ripping - off failure
3B19-8L3	11.62	8.27	14.67	43	13.76	1.66	Ripping - off failure

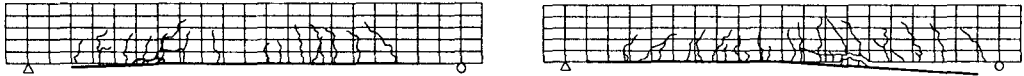
* the ratio of ultimate deflection to the deflection under the yielding load ($\mu = \delta_u / \delta_y$)

3.4.1 파괴하중

실험결과 CFRP로 보강된 실험체의 파괴하중은 보강전에 비해 22~107% 증가하였다. 실험변수에 따른 보강 전·후의 파괴하중을 분석한 결과 콘크리트의 강도가 클수록, 콘크리트의 피복두께가 작을수록, 철근비가 작을수록, 보강길이가 길수록 보강후 파괴하중의 증가비 즉, 보강효율이 커짐을 알 수 있었다.

3.4.2 파괴형태

기준 실험체와 보강된 실험체에 대한 휨실험 결과 휨파괴(flexural failure), 계면박리파괴(interface debonding failure) 그리고 단부박리파괴(ripping-off failure)양상을 보였다. 본 실험에서 계면박리파괴를 보인 실험체들의 경우 보강단부에서 1차적인 계면박리파괴를 보인 이후 2차적인 단부박리파괴형태를 보였다. 이와 같은 1차적인 계면박리파괴는 CFRP 단부 부근의 휨 균열 주위 계면에서 전단응력이 부착응력을 초과하여 발생한 것으로 보이며, 2차적인 단부박리파괴를 보인 원인은 1차적인 계면박리파괴에 의한 보강길이의 감소로 인해 단부박리 파괴형태를 보인 것으로 판단된다.



(a) Ripping-off failure(2B16-8L3)

(b) Ripping-off failure(2B16-9L3)

Fig. 3 Failure modes of specimen

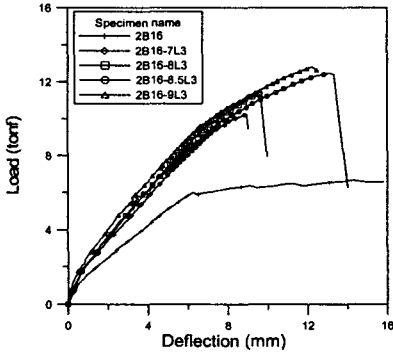


Fig. 4 Load-deflection curves(2B series)

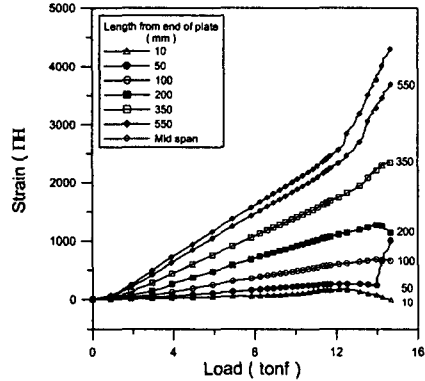


Fig. 5 Load-strain curve(3B19-8L3)

3.4.3 하중-처짐과 인장철근-CFRP 변형률

Fig. 4와 같이 보강길이에 따른 하중-처짐 관계를 분석한 결과 기준실험체에 비해 보강된 실험체의 강성이 증가하였음을 알 수 있다. 그러나 무보강 상태의 기준 실험체를 제외한 모든 실험체에서 긴 연성구간을 갖지 못하고 항복하중 이후 갑자기 파괴됨을 확인할 수 있었다. 또한 보강길이가 증가하는 경우 하중-처짐 거동은 거의 동일한 양상을 보이거나 파괴하중은 증가함을 보였다. 각 실험체의 파괴시 부재 중앙부에서의 CFRP 변형률 값을 관찰한 결과 파괴형태별 CFRP의 평균변형률은 계면박리파괴와 단부박리 파괴가 각각 2976 μE 과 4364 μE 이었다. 따라서 단부박리파괴가 계면박리파괴에 비하여 합성거동이 우수하다고 판단할 수 있다.

3.4.4 CFRP의 완전합성구간

단부박리파괴 형태를 보이는 실험체의 경우 인장철근-CFRP 변형률곡선을 보면 철근콘크리트 인장부에 초기균열 발생 이전 단계에서는 변형률의 증가율이 작은값을 보인다. 초기균열 발생 이후 CFRP는 직선적인 변형률 분포를 보이지만 CFRP 단부 부근에서 부분합성거동에 의해 변형률의 증가율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와같이 CFRP의 단부에서 변형률의 증가율이 감소하는 부분까지의 거리를 정착길이라고 정의하였다. Fig. 5는 실험을 통해 얻어진 CFRP의 하중-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 계면박리파괴를 보인 실험체들의 경우 완전합성거동의 위치는 경간중앙부에서 관찰되거나 위치를 확인할 수 없었다. 그러나 단부박리 파괴를 보인 실험체들의 경우 보강길이의 변화에 관계없이 단부로부터 일정한 거리인 35cm 정도에서 완전합성거동을 시작함이 관찰되었다. 계면박리 파괴를 보인 실험체들의 경우 합성거동 위치가 위와 같이 나타나는 이유는 휨 균열 주위 계면에서의 전단응력이 부착응력을 초과하였기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 계면박리파괴된 실험체들의 경우 박리파괴시 경간중앙부에서 CFRP 변형률이 단부박리파괴형태 보다 작으며 CFRP와 콘크리트가 경간중앙부 근처에서만 합성거동함을 나타낸다. CFRP 단부로부터 완전합성거동의 시작점까지의 거리인 35cm위 치에서 측정된 CFRP 변형률은 1398 μE ~2040 μE 의 범위 내에 측정되었으며, 완전합성거동의 시작위치에서 CFRP의 변형률 값을 제한한다면 단부박리파괴를 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4.5 실험결과와 기존 제안식과의 비교 및 고찰

실험결과와 Nguyen 및 영국규준에 따른 CFRP의 정착길이는 Table 4와 같다. 단부박리파괴에 대해서는 본 실험결과와 Nguyen의 제안식이 거의 일치함을 보였으나 BS 규준식은 실험 및 Nguyen의 제안식에 따른 결과에 비하여 과소평가함을 보였다.

또한, 계면박리파괴를 보인 실험체들에 있어서는 두 제안식 모두 실험결과와 상이한 차이를 보이는 데 이는 두 제안식 모두 단부박리파괴에 국한되어 제시된 식이기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 아직 연구가 미흡한 계면박리파괴에 대한 연구와 함께 계면박리파괴시 요구되는 정착길이 산정에 관한 연구도 추가적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

Table 4 Distance from end of plate to start point of full composite behavior

Specimen	Exp.(cm)	Nguyen(cm)	BS(cm)	Failure mode
1B16-8L3	80	38.447	31.6	Interface debonding failure
1B16-8L4	-	42.632	31.6	
2B16-7L3	-	35.969	26.6	
2B16-8L3	80	35.969	26.6	
2B16-8.5L3	35	35.969	26.6	Ripping-off failure
2B16-9L3	35	35.969	26.6	
3B13-8L3	35	35.514	24.9	
3B16-8L3	35	35.514	24.9	
3B19-8L3	35	35.514	24.9	

4. 결 론

본 연구에서는 실험을 통해 얻어진 CFRP의 변형률을 토대로 CFRP의 완전합성거동 위치를 조사 하였으며, 이를 기존 제안식의 결과와 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CFRP의 보강에 의해 파괴하중은 1.22~2.07배 증가하였으며, 하중-처짐곡선을 통해서 기준실험체에 비해 강성 증진 효과를 확인할 수 있었다.
2. 경간중앙부에서 CFRP 변형률의 평균은 계면박리파괴시는 2334 $\mu\epsilon$, 단부박리파괴시는 4364 $\mu\epsilon$ 으로 측정되었으며, 이를 통해 단부박리 파괴가 계면박리파괴에 비해 합성거동이 우수함을 확인하였다.
3. 단부박리 파괴시 철근의 항복시점 또는 CFRP 변형률의 2차적인 선형변화 시점의 하중단계에서 보강판과 콘크리트 사이의 완전합성거동 위치를 측정된 결과 35 cm로 일정하게 측정되어 이를 정착 길이로 규정지을 수 있다고 판단된다.
4. 기존의 정착길이 결정을 위한 Nguyen의 제안식과 BS규준식에 따른 결과를 본 실험결과와 비교한 결과 단부박리파괴를 보인 실험체에 있어서는 Nguyen의 제안식과 일치함을 보였지만 BS규준식은 정착길이를 과소 평가함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Nguyen, D. M., Chan, T. K., and Cheong, H. K., "Brittle Failure and Bond Development Length of CFRP-Concrete Beams," Journal of Composite for Construction, Vol. 5, No. 1, February, 2001, pp. 12~17.
2. Roberts, T. M., "Approximate Analysis Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams," The Structural Engineer, Vol. 67, No. 12, June, 1989, pp. 229~233.
3. The Concrete Society, "Design Guidance for Strengthening Concrete Structures using Fibre Composite Materials," 2000, pp 37~38.