

탄소섬유 보강판(CFRP)으로 보강한 철근콘크리트 보의 강성예측에 관한 연구

The Study of the Strength prediction of RC Beam with Externally bonded Carbon Fiber Reinforced Plate

한상훈* 최홍식** 홍기남*** 신동주****
Han, Sang Hoon Choi, Hong Shik Hong, Kee Nam Shin, Dong Ju

ABSTRACT

The purpose of this paper is to predict the flexural strengthening of reinforced concrete beams by the external bonding of carbon fiber reinforced plate(CFRP) to the tension face of the beam. Used computational equation is derived by relation of stress and strain. This equation is applied to four-nondamage beam and two-preloading beam. Six scale beams were tested to evaluate the strength enhancement provided by the CFRP. And describes the strength enhancement provided to the flexral capacity of reinforced concrete beam by the external bonding of CFRP. An inelastic section analysis procedure was developed that accurately predicts the load displacement response of the retrofitted beams.

1. 서론

콘크리트 구조물들의 부적절한 설계, 노후화, 화재, 지진등의 여러 가지 이유로 구조물의 내력이 저하될 수 있다 부족한 내력을 향상시키기 위해 탄소(Carbon)섬유, 아라미드(Aramid), 유리(Glass)섬유 등 각종 보강재료들이 사용되고 있다. 특히 탄소섬유 보강판(CFRP)은 강재와 비교하여 인장강도가 높고, 내식성과 경량성등 강재가 갖고있지 않는 특성을 지니고 있기 때문에, 토목구조물이나 건축물에 실제 많이 사용되고 있다. 기존 연구자료들 대부분이 CFRP로 보강한 콘크리트 보의 휨성능과 전단성능의 효과를 설명하고 있다. 본 연구에서는 CFRP를 보강한 RC보의 하중-처짐 가상곡선을 이용하여 강성예측식을 제안하였으며, 내하력 실험을 통하여 그 타당성을 검증하고, 더 나아가 휨보강된 RC보의 올바른 강성예측식의 토대를 제공하고자 한다.

* 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원, 충청대학 토목과 교수

*** 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

**** 충북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

2 실험 계획

2.1 실험 재료

본 실험에서 사용된 콘크리트 강도는 재령 28일에서 측정된 공시체의 평균 압축 강도를 기준으로 하였으며, 28일 압축강도는 212kgf/cm^2 이다. 철근의 항복응력은 3552kgf/cm^2 인 철근을 사용하였으며 압축측에는 2D10을 그리고 인장측에는 2D13을 배근하였다.

2.2 실험 변수

본 연구에서는 실험변수로서 선행하중(극한하중의 75%)의 재하 여부, 단부보강의 유·무를 고려하였으며 이를 토대로 총 7개의 시험체를 제작하였다. 각각의 실험변수를 표 2.2에 나타내었다.

2.3 실험체 제작

실험을 위해 <그림 2.1>과 같이 실험체를 제작하였다. 순지간이 200cm로 4점재하를 하였으며, 처짐을 측정하기 위해 LVDT를 중앙에 설치하였다.

표 2.1 보수 재료의 역학적 성질

물성 항목	재료			
	항복강도 (kgf/cm^2)	압축강도 (kgf/cm^2)	인장강도 (kgf/cm^2)	탄성계수 (kgf/cm^2)
콘크리트	-	212	21	2.17×10^5
Epoxy	-	810	316	7.65×10^4
철근	3552	-	5218	2×10^5
CFRP	22863	-	22863	1.99×10^6

표 2.2 시험체별 변수

구분	부재이름	선행하중 의 유·무	단부보강의 유·무	
			유·무	부재 수
Control Beam	BC	-	-	1
Group A	BN-N1	×	무보강	1
	BN-N2		무보강	1
	BN-U1		U형보강	1
	BN-U2		U형보강	1
Group B	BN-N	○	무보강	1
	BN-U		U형보강	1

3. CFRP보강 RC보의 강성예측 단면해석

3.1 강성예측 단면해석

단면해석을 위해 하중-처짐의 관계를 <그림 3.1>과 같이 하중-처짐 가상곡선으로 4개의 영역으로 나누어 완전탄성거동, 콘크리트 인장부균열, 인장철근 비탄성, 콘크리트 압축부 비탄성을 고려하여 각 구간마다 해석을 달리하였다. 또한, 일반적인 응력-변형률 곡선을 <그림 3.2>와 같이 해석을 위해 응력-변형률의 3중 선형곡선으로 간편화하였다

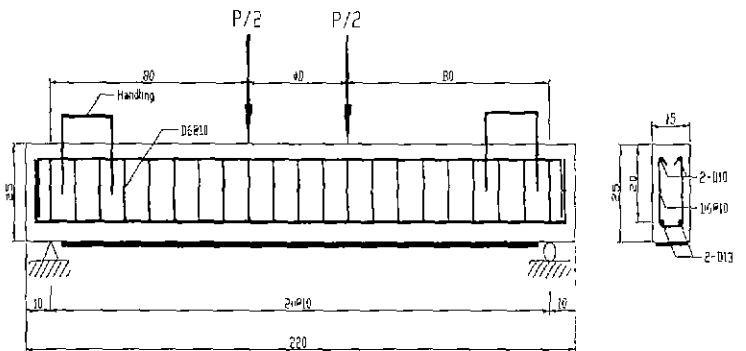


그림 2.1 실험체 제작 (단위 : cm)

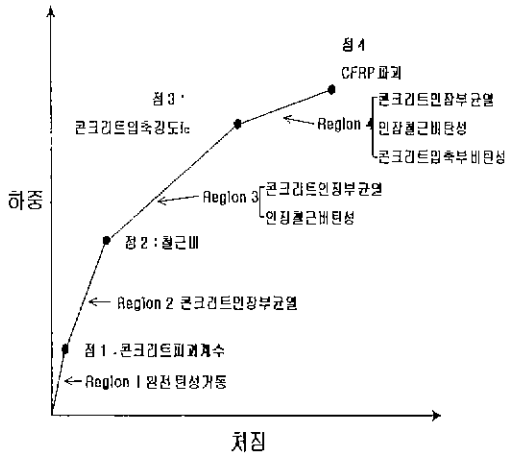


그림 3.1 하중-처짐 가상곡선

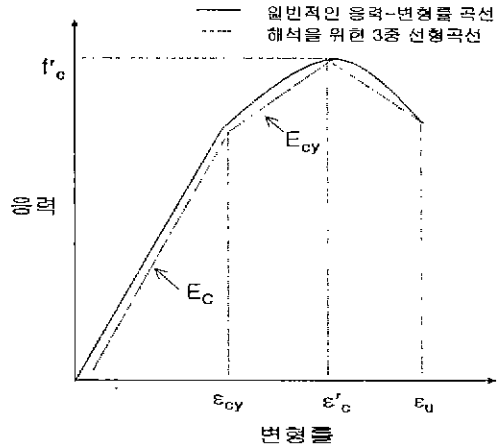
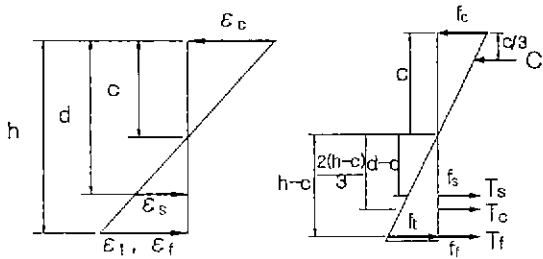
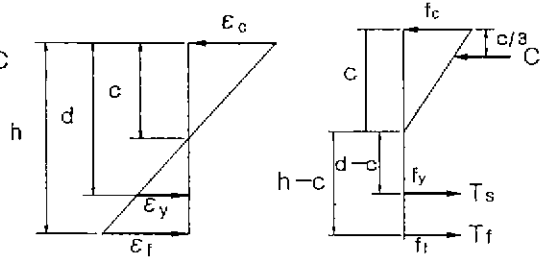


그림 3.2 응력-변형률의 3중 선형곡선



(a) 변형률 분포도 (b) 응력과 내부분포도
그림 3.3 응력-변형률 분포도 가정(Region 1)



(a) 변형률 분포도 (b) 응력과 내부분포도
그림 3.4 응력-변형률 분포도 가정(Region 2)

Region 1

이 영역에서는 단면의 인장영역에서 콘크리트 응력이 파괴계수 f_r 에 도달할 때 까지 모든 재료(콘크리트, 철근, CFRP)가 완전 탄성거동을 한다고 가정한다. 그러므로 <그림3.3>과 같은 휨거동 양상이 될 것이다. 이와같은 휨의 가정조건을 힘의 합력으로 나타낼 수 있으며, 이를 중립축 c 에 대하여 정리하여 나타내면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$c = \frac{h^2 + 2N_s A_s d/b + 2N_f t h}{2h + 2N_s A_s/b + 2N_f t} \quad (1)$$

Region 1의 하중-처짐곡선의 경사로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(P/\delta)_1 = K(EI)_1 \quad (2)$$

또한, $(ED)_1$ 은 중립축 거리 c 의 항으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(ED)_1 = E_c bc^3/3 + E_c b(h-c)^3/3 + E_s A_s (d-c)^2 + E_f bt(h-c)^2 \quad (3)$$

하중 P_1 과 휨모멘트 M_1 을 파괴계수와와의 관계로 표현하여 나타내면,

$$f_r = M_1(h-c)/I_1 = P_1 L(h-c)/5I_1 \quad (4)$$

식(4)으로부터 나온 P_1 을 가지고 치점 δ_1 을 구하면 다음과 같다.

$$\delta_1 = P_1 / (P/\delta)_1 \quad (5)$$

Region 2

이 영역은 콘크리트 인장측에 균열이 발생하여 그 기능을 상실하였다고 가정하여 단면을 해석하는 영역이다. 중립축 거리 c 에 대한 2차 방정식과 모멘트 M_2 는 각각 식(6)과 식(7)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$c^2 + 2(N_s A_s / b + N_f t) c - 2(N_s A_s d / b + N_f t h) = 0 \quad (6)$$

$$M_2 = \varepsilon_y E_c bc^3/3(d-c) + f_y A_s (d-c) + \varepsilon_y E_f bt(h-c)^2/(d-c) \quad (7)$$

계산된 M_2 로부터 하중 P_2 를 구하고, Region 1에서의 P_1 과 Region 2에서의 P_2 로부터 변위 $\Delta_2 = (P_2 - P_1) / (P/\delta)_2$ 를 알 수 있으며, δ_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta_2 \quad (8)$$

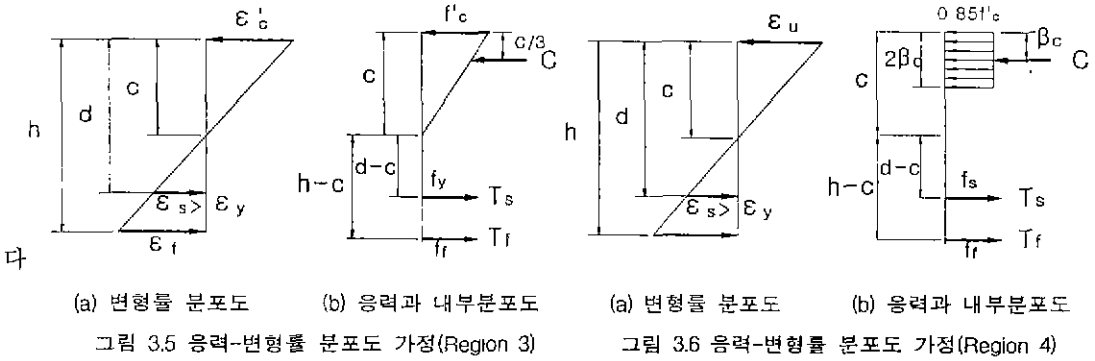
Region 3

이 영역에서의 철근은 비탄성적 거동을 나타낸다. 보의 압축면에서 이 Region3의 끝점에서의 콘크리트 응력은 f'_c 에 도달될 것이고, 콘크리트 압축변형률 ε'_c 을 얻을 수 있을 것이다. 힘의 합력이 0이라는 것으로써 중립축 거리 c 와 모멘트 M_3 및 $(ED)_3$ 를 구하면 각각 다음과 같이 표현될 수 있다

$$f'_c bc^2 - 2[f_y A_s - \varepsilon_c (E_f bt + E_t A_s) - \varepsilon_y E_t A_s] c - 2\varepsilon'_c (E_t A_s d + bthE_f) = 0 \quad (9)$$

$$M_3 = f'_c bc^2/3 + (f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_y) E_t) A_s (d-c) + \varepsilon'_c E_f bt(h-c)^2/c \quad (10)$$

$$(ED)_3 = E_c bc^3/3 + E_t A_s (d-c)^2 + E_f bt(h-c)^2 \quad (11)$$



그리고 점2에서 3으로부터 변위에서 증가량은 $\Delta_3 = (P_3 - P_2)/(P/\delta)_3$ 이고, 점3에서 총처짐은 음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_3 = \delta_2 + \Delta_3 \quad (12)$$

Region 4

이 영역에서는 중립축 위치를 결정하기 위해 <그림 3.6>에서 보여진 이 등가응력 분포는 콘크리트의 압축력 C 를 나타내기 위한 실험적인 매개변수 α 와 β 를 사용한다. 이들 매개변수는 f'_c 에 기초를 두고 있으며 이들 값은 대략 $\alpha=0.72$, $\beta=0.425$ 를 사용한다. 여기서 작용되는 힘들의 합력으로부터 <식 13>과 같이 중립축 위치 c 에서의 2차방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\alpha f'_c \beta c^2 + [\epsilon_u (E_f b t + E_t A_s) + (\epsilon_y E_t - f_y) A_s] c - \epsilon_u (E_t A_s d + b t h E_f) = 0 \quad (13)$$

Region 4에선, CFRP의 파괴보다 먼저 콘크리트가 분쇄될 것이고, 또한, CFRP는 CFRP와 접착제, 또는 콘크리트 접착면 에서 낮은 전단 강도 사이에서 불충분한 강도 때문에 떨어져나갈 것이다. 그러므로, 하중 P_4 는 필연적으로 이들 계산된 값들에 도달할 것이라고는 기대되지 않는다. 그러나 Region 4에서 하중-처짐 곡선의 기울기를 결정하기 위해 필요하다. 모멘트 M_4 과 $(EI)_4$ 및 Δ_4 를 구하면 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_4 = \alpha f'_c \beta c^2 (1 - \beta) + [f_y + E_t (\epsilon_y - \epsilon_c)] A_s (d - c) + f_{Ft} b t (h - c) \quad (14)$$

$$(EI)_4 = E_t A_s (d - c)^2 + E_f b t (h - c)^2 \quad (15)$$

$$\Delta_4 = P_4 / (P/\delta)_4 \quad (16)$$

따라서, 점4에서 총처짐은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_4 = \delta_3 + \Delta_4 \quad (17)$$

4 결과 및 분석

4.1 실험결과

선행하중의 유·무와 단부보강의 유·무에 따른 휨거동의 특성을 알아보면 상기의 변수는 휨강성에 큰영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

4.2 강성예측식과의 비교

다음 <그림4.2>에 나타나 있듯이 Region1, 2, 3 에서는 거의 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다. Region2 부근에서 약간의 과대평가를 하고있고 있으나 아주 근소한 차이를 보이고 있다. Region4 에서는 일정구간 일치율을 보이다가 CFRP의 탈락에 의해서 실제거동과는 상당한 차이를 보이고 있다.

5. 결론

(1) 선행하중의 유·무, 단부보강의 유·무에 따른 휨거동은 휨강성에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

(2) 강성예측식에 의한 값과 실제 실험값이 Region1, 2, 3 에서는 서로 거의 일치함을 보이고 있어 CFRP보강 RC보의 강성예측식으로 충분히 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 Region4 에서는 일정구간 일치율을 보이다가 CFRP의 탈락에 의해서 실제거동과는 상당한 차이를 보이고 있어 CFRP의 단부박리하중을 고려하는 강성예측식에 적절한 감소계수가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. C.Allen Ross, David M.Jerome, "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates", ACI, V.96, No.2, March-April, 1999, pp212-220
2. Alfarabi sharif, I.A.Basunbul "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams using FRP Plates", ACI, V.91, No.2, March-April, 1994. pp160-168

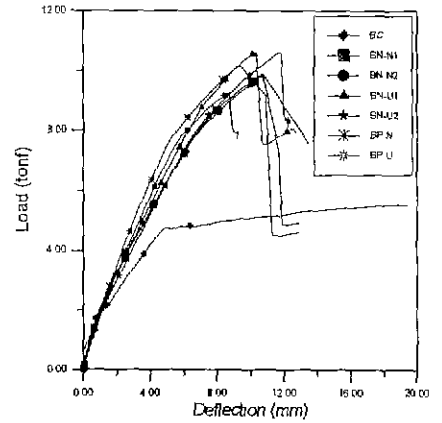
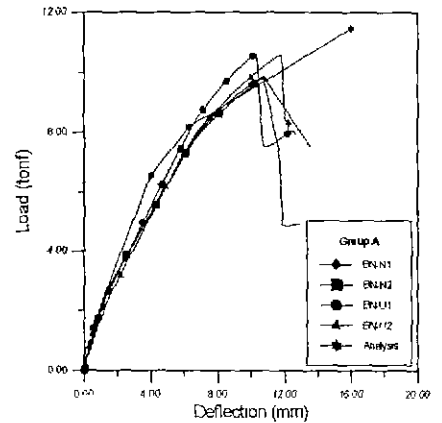
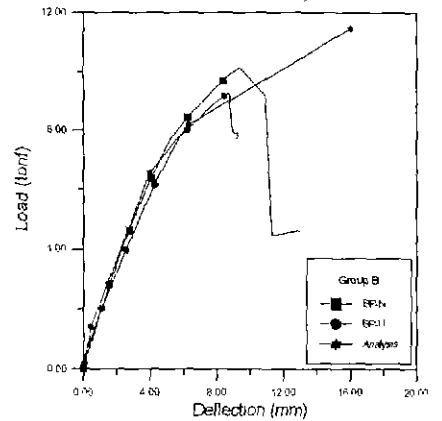


그림 4.1 하중-치질곡선



(a) Group 1



(b) Group 2

그림 4.2 강성예측식과 Test의 비교