

비선형 해석을 통한 보강된 RC 보의 거동 예측

Behavior Prediction of Strengthened Reinforced Concrete Beam using Nonlinear Analysis

박 중 열* 황 선 일* 조 홍 동** 한 상 훈***
Park, Jung Yeol Hwang, Sun Il Cho, Hong Dong Han, Sang Hoon

ABSTRACT

In this study, to predict the behavior of RC beam strengthened with Carbon fiber reinforced polymer(CFRP) plate, analytical program considering material non-linearity is developed. Strain compatibility and force equilibrium are applied and internal forces of constitutive material are calculated using nonlinear stress-strain relationship. Also, to certainty the reliability of analytical program, deflection, strain of CFRP plate, change of neutral axis on cross section and crack distribution at failure are compared with those of experiment, and each results are almost coincident.

1. 서 론

역학적인 특성이 우수하고 내부식성의 장점을 갖고 있는 CFRP판은 교량 및 건축구조물의 휨보강을 위해 강판대용으로 많이 이용되고 있다. 그러나 CFRP판으로 보강된 철근콘크리트 구조물은 무보강된 경우와는 상이한 거동 특성을 보이며, 재하 하중이 증가함에 따라 콘크리트의 균열발생이나 재료의 비선형에 기인하여 선형 탄성이론에 기초하여 거동을 예측하는 경우 실제 거동과는 차이를 보일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 CFRP판으로 휨 보강된 RC 보의 비선형 거동 예측을 위해 재료의 비선형성을 고려한 구성방정식을 형성하고 이를 이용한 해석프로그램을 개발하였다. 또한 변형률 적합조건과 하중평형 이론을 적용하였으며, 이때 구성 재료의 내력은 비선형 응력-변형률 관계를 이용하여 계산하였다. 개발된 해석프로그램의 타당성을 입증을 위해 하중-처짐, CFRP판의 변형률, 단면의 중립축 위치와 파괴시의 균열 분포를 실제 실험결과와 비교하였다.

* 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사수료

** 정회원, 충북대학교 토목공학과 공학박사, 연구원

*** 정회원, 충북대학교 토목공학과 공학박사, 교수

2. 재료의 비선형 특성

Fig. 1은 CFRP판으로 보강된 RC 보의 단면과 단면에서의 변형률 및 응력 분포를 나타낸 것으로 압축철근과 인장을 받는 콘크리트를 해석에서 고려하였다. 변형률은 Fig. 1(b)와 같이 전단면에 대해 선형적으로 변화한다고 가정하였으며, 우력에 의한 모멘트와 외력 모멘트는 평형이 된다고 보았다. 이때 각 재료들의 내력은 구성방정식을 통해 계산된 응력을 이용하여 계산할 수 있다.

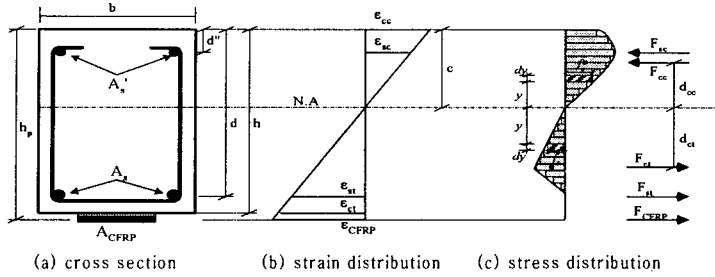


Fig. 1 Stress and strain distribution in the cross section

2.1 재료의 구성 모델

콘크리트의 응력-변형률 관계는 압축과 인장을 받는 경우에 차이를 보이며, 압축을 받는 콘크리트의 응력-변형률 관계를 나타내기 위해 Fig. 2와 같이 Saenz의 제안식을 사용하였다. Saenz의 제안식은 일축 압축상태에 있는 콘크리트의 비선형 거동을 표현하기 위해 상승부와 하강부의 거동을 가장 잘 표현하며 광범위하게 사용되고 있다고 언급되고 있다. 또한 콘크리트의 인장 균열에서는 콘크리트의 저항력이 존재하지 않지만 균열과 균열 사이에서 철근과의 부착에 의해 저항력을 유지하는 인장경화효과(tension stiffening effect)가 발생하게 된다. 이를 고려하기 위해 인장을 받는 콘크리트의 응력-변형률 관계는 bilinear 인장 경화모델을 이용하였으며, Fig. 3과 같이 균열 발생이후 변형 연화(strain softening) 영역을 선형분포로 단순화시켰다. 인장과 압축을 받는 콘크리트의 내력과 내력의 작용 위치는 Fig. 1(c)의 응력 분포를 통해 계산된 압축응력을 적분함으로써 계산할 수 있다.

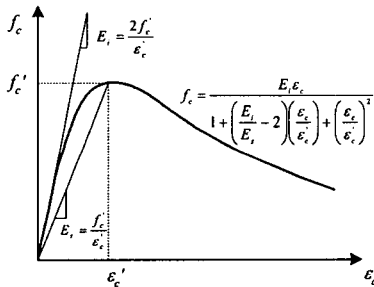


Fig. 2 Compression stress-strain relation of concrete

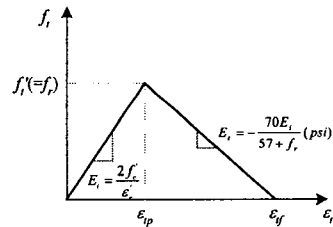


Fig. 3 Tension stress-strain relation of concrete

철근은 콘크리트에 비해 균질한 재료이므로 압축과 인장에 대한 응력-변형률 관계가 거의 유사하게 나타난다. 따라서, 인장철근과 압축철근에 대해 동일한 응력-변형률 관계를 적용하였다. 철근의 응력-변형률 관계는 철근 항복이후 E_s' 의 기울기를 가지고 선형으로 변화하는 변형률 경화(strain hardening) 특성을 고려한 모델을 사용하였다.

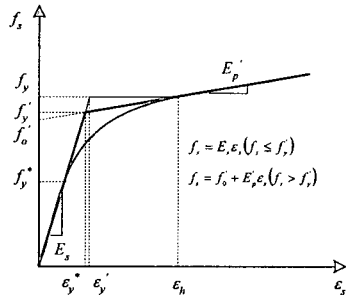


Fig. 4 Stress-strain relation of steel

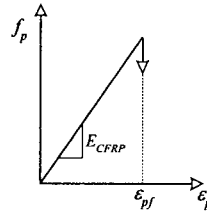


Fig. 5 Stress-strain relation of CFRP plate

인장철근의 내력과 압축철근의 내력은 Fig. 4에서 계산된 응력에 철근의 단면적을 곱하여 계산한다. CFRP판은 파단시까지 선형 탄성거동을 하므로 Fig. 5와 같이 직선적인 응력-변형을 관계를 가진다. CFRP판의 내력은 CFRP판의 변형률에 탄성계수와 단면적을 곱하여 계산할 수 있다.

3. 해석 프로그램의 구성

CFRP판으로 휨 보강된 RC 보의 비선형거동 예측을 위해 개발된 해석 프로그램의 흐름도는 Fig. 6과 같다. 변형률 적합조건, 재료들의 구성방정식과 내력 평형개념을 통해 하중단계별 중립축 위치와 각 재료들의 변형률 그리고 보의 처짐이 결정된다.

4. 해석결과 비교

해석 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위해 해석결과를 실험결과와 비교하였으며, 이를 위해 Fig. 7과 같은 형상의 실험체를 제작한 후 휨실험을 수행하였다. Table 1은 실험체 및 실험변수를 나타낸 것으로 콘크리트의 강도, CFRP판의 보강길이 그리고 철근비를 실험변수로 고려하였다. 사용된 CFRP판의 탄성계수는 $1,684,000 \text{kgf/cm}^2$ 이다.

4.1 하중-처짐 거동

본 실험에서 관찰된 각 실험체의 파괴하중과 처짐 그리고 파괴형태는 Table 1과 같다. 콘크리트의 강도가 271kgf/cm^2 인 실험체에 대해서, CFRP로 보강된 실험체의 파괴하중은 보강전에 비해 1.46~1.82배 증가하여 보강을 통한 휨성능 증대효과가 우수함을 알 수 있었다. 또한 기준실험체가 인장철근의 항복이후 콘크리트 압축부의

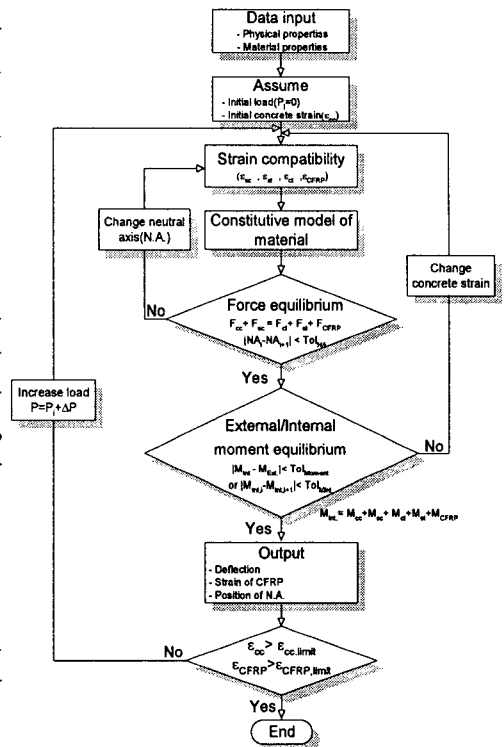


Fig. 6 Flow chart

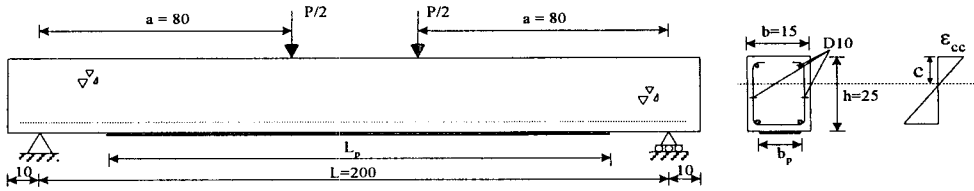


Fig. 7 Loading configuration and cross section of RC beam(unit : cm)

Table 1 Details of tested beams and test results

Specimen	Strength of concrete (kgf/cm ²)	CFRP plate		Reinf. rebar	Yielding of rebar		Ultimate state			Ductility index	Failure mode
		Length (L _p , cm)	Width (b _p , cm)		Load (tonf)	Disp. (mm)	Load (tonf)	increasing ratio	Disp. (mm)		
CB16	271	-	-	D16	5.82	5.99	7.02	-	28.55	4.77	Flexural
1B16-8L3	161	160(0.8L)	10	D16	8.96	8.17	10.33	-	10.74	1.31	Interface debonding
2B16-7L3	271	140(0.7L)	10	D16	9.40	7.40	10.26	1.46	8.94	1.21	Interface debonding
2B16-8L3	271	160(0.8L)	10	D16	9.66	7.10	11.28	1.61	9.61	1.35	Interface debonding
2B16-8.5L3	271	170(0.85L)	10	D16	9.81	7.56	12.47	1.78	13.09	1.73	Interface debonding
2B16-9L3	271	180(0.9L)	10	D16	9.20	6.26	12.79	1.82	12.18	1.95	Ripping off
3B13-8L3	328	160(0.8L)	10	D13	8.81	7.26	10.48	-	10.54	1.45	Ripping off
3B16-8L3	328	160(0.8L)	10	D16	8.30	5.82	12.57	-	12.79	2.20	Ripping off
3B19-8L3	328	160(0.8L)	10	D19	11.64	8.27	14.67	-	13.76	1.66	Ripping off

파쇄에 의한 휨파괴 양상을 보이는 반면, 보강된 실험체에서는 CFRP판의 계면박리(interface debonding)와 콘크리트 피복두께를 물고 떨어지는 단부박리파괴(ripping off) 양상을 보였다. CFRP판을 철근콘크리트 구조물에 보강한 경우 문제가 되는 점은 CFRP판이 충분한 성능을 발휘하지 못하고 박리된다는 점과 취성적으로 파괴되는 점이다. 이러한 특성은 인장철근 항복시점의 처짐과 극한상태의 처짐의 비를 나타내는 연성지수를 통해 알 수 있다. 즉, 기준실험체의 연성지수가 4.77인 반면 CFRP판으로 보강된 실험체의 연성지수는 1.21~2.20로 작은 값을 보여 보강을 통해 취성적인 거동특성이 나타남을 확인할 수 있었다.

CFRP판으로 보강된 RC 보 경간 중앙부에서의 휨강성은 식(1)과 같이 휨모멘트와 곡률의 관계를 이용하여 계산할 수 있으며, 이 값을 식(2)의 처짐 계산식에 대입하여 하중 단계별 처짐을 계산하였다.

$$(EI)_e = \frac{M}{k} \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{(P/2)a}{24(EI)_e} (3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

Fig. 8은 기준실험체와 CFRP판의 보강길이를 변화시킨 경우 하중-처짐에 대한 해석결과와 실험결과를 비교한 것으로 파괴시까지 거동이 거의 일치하고 있지만 대부분의 실험체에서 실제 처짐을 약간 과소 평가하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서는 CFRP와 콘크리트 사이의 부착면에서의 미끄러짐의 영향을 고려하지 않은 것이 큰 이유라고 판단된다. 그러나 보강길이가 길어짐에 따라 부착성능 증대로 인해 예측된 처짐과 실제 처짐이 거의 일치함을 보였다.

실험변수에 따른 영향을 살펴보면, 콘크리트 강도가 상대적으로 클수록, 보강길이가 증가할수록, 그리고 철근비가 작을수록 해석결과와 실험결과가 비교적 일치함을 알 수 있다. 이러한 변수들은 CFRP의 부착강도 특성에 영향을 미치는 요인들로서 부착특성이 개선됨으로 인해 해석결과와 잘 일치한다고

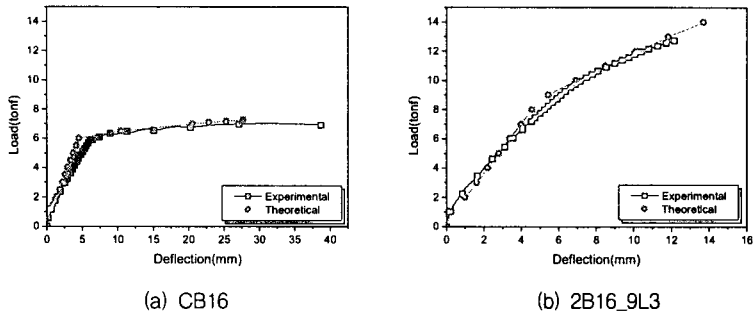


Fig. 8 Load-deflection curves

판단된다. 그러나, 3B19-8L3 실험체의 경우는 실험결과와 큰 차이를 보이고 있어 철근비가 해석결과와 실험결과의 차이에 가장 크게 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이는 인장철근과 콘크리트 사이의 부착효과를 해석프로그램에서 고려하지 않은 것이 이유라고 판단된다.

4.2 CFRP판의 변형률

Fig. 9는 해석적인 방법을 통해 얻어진 CFRP판의 하중 단계별 변형률을 실험결과와 비교한 것이다. CFRP판의 하중-변형률 곡선은 콘크리트의 초기균열 발생, 인장철근의 항복시점을 기준으로 크게 세 구간으로 구분할 수 있으며, 이러한 특성을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 콘크리트의 초기 균열 발생이후 인장력을 인장철근과 CFRP판이 부담하면서 CFRP판의 변형률이 증가하며, 인장철근의 항복 이후에는 CFRP판이 대부분의 인장력을 저항하게 되면서 변형률이 크게 증가하게 된다. 대부분의 실험체에서 CFRP판의 박리에 의한 파괴가 발생할 때까지 해석결과와 실험결과가 거의 유사하게 나타났으며, 실험변수에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다.

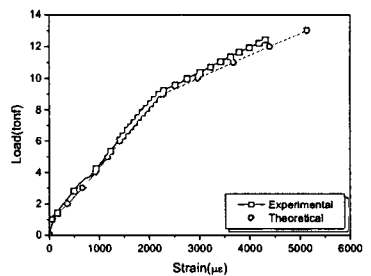


Fig. 9 Load-strain curve(3B16-8L3)

4.3 중립축 위치

Fig. 10은 중립축 위치에 대한 실험결과와 해석결과를 비교한 것으로 기준실험체와 비교하여 보강된 실험체는 CFRP판의 박리로 인해 갑작스럽게 파괴되므로 파괴시 기준실험체와 같은 중립축 상승은 관찰되지 않았다. 또한, CFRP판의 박리에 의한 파괴 전까지는 중립축 변화 양상이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

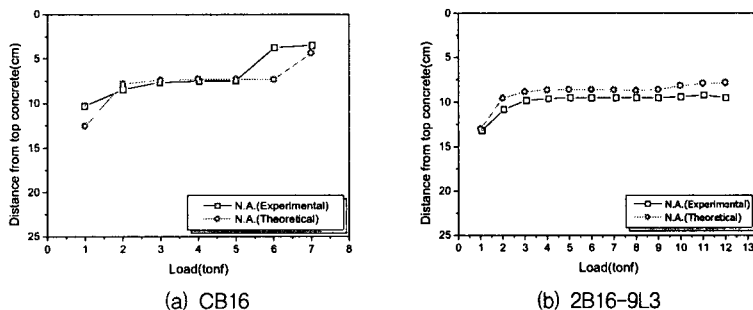


Fig. 10 Comparison of neutral axes

4.4 균열분포

Fig. 11은 해석 결과를 통해 얻어진 기준실험체와 CFRP판으로 보강된 실험체의 파괴 시점에서의 균열 분포(음영)와 실제의 균열형상을 비교한 것이다. 기준실험체와 비교하여 보강된 실험체에서는 많은 균열이 발생하였으며, 균열 간격도 좁아져 CFRP판에 의한 균열 분산효과를 확인할 수 있었다. 또한, 해석결과의 경우 CFRP판의 단부와 하중 재하점에서 기하학적 그리고 하중 변화에 기인하여 균열 분포의 변화 양상을 보이지만 대부분의 경우에서 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

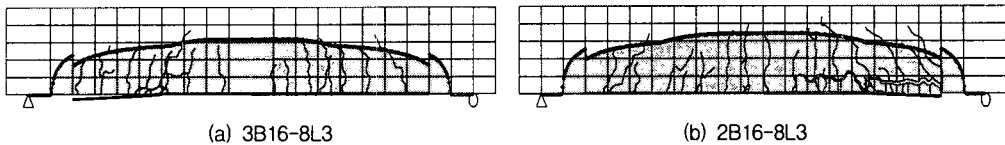


Fig. 11 Comparison of crack propagation between experimental and analytical results

5. 결론

본 연구에서는 CFRP판으로 보강된 RC 보의 비선형 거동 예측을 위해 해석 프로그램을 개발하였으며, 이를 실험결과와 비교·분석하였다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CFRP판으로 보강된 RC 보의 하중-처짐, CFRP판의 변형률, 중립축 위치, 균열분포 등에 대한 해석결과와 실험결과와의 다양한 비교 연구를 통해 개발된 프로그램의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
2. 하중-처짐의 경우 상대적으로 콘크리트 강도가 크고, 보강길이가 증가하고 철근비가 상대적으로 작은 경우와 같이 부착 특성이 개선되는 경우 실험결과와 해석결과가 거의 일치함을 보였다.
3. 다른 실험변수와 비교하여 철근비가 하중-처짐에 대한 해석결과와 실험결과와의 차이에 가장 크게 영향을 주고 있으며, 이는 인장철근과 콘크리트 사이의 부착효과를 고려하지 않은 것이 큰 이유로 보인다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 철근의 부착특성에 대한 고려가 요구된다.

참고문헌

1. 심중성 외(1997) 강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트보에 대한 해석적 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 9권, 6호, pp. 129~137.
2. 오병환 외(1994) 콘크리트 구조물의 비선형해석을 위한 재료모델 비교연구, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 6권, pp. 65~70.
3. Arduini, M. et al(1997) Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 4, pp. 363~370.
4. Hsu, T. T. C.(1993) Unified Theory of Reinforced Concrete, CRC Press, pp. 196~218.
5. Saenz, L. P.(1964) Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete by Desayi and Krishman, ACI Journal, Proceedings, Vol. 61, No. 3, pp. 1229~1235.