

FRP로 진단보강된 철근콘크리트 보의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beams Shear-Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Composites

김 상 우* 황 현 복** 이 범 식*** 이 정 윤****
Kim, Sang-Woo Hwang, Hyun-Bok Lee, Bum-Sik Lee, Jung-Yoon

ABSTRACT

This study presents the nonlinear finite element analysis to predict the behavior of reinforced concrete (RC) beams shear-strengthened with fiber-reinforced polymer laminates (FRP). In this paper, modeling concept for the FRP is introduced to enable the use of finite element methods for the shear analysis of RC beams shear-strengthened with FRP composites. The numerical techniques are used to represent the FRP composite, bond properties between the FRP and the concrete, and the RC beams. According to the proposed modeling methods, a finite element analysis is performed using a two-dimensional nonlinear finite element analysis program, VecTor2, based on the Disturbed Stress Field Model (DSFM). To verify the application of the DSFM for the prediction of the behavior of the shear-critical beams strengthened with FRP composites in shear, a detailed comparison between experimental and numerical results for the response of the RC beams is carried out.

요 약

이 연구에서는 FRP(fiber reinforced polymer)로 진단보강된 철근콘크리트(RC) 보의 전단거동을 예측하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행한다. FRP로 진단보강된 RC 보의 유한요소해석을 위하여 이 논문에서는 FRP에 대한 모델링 개념을 소개하며, RC 보와 FRP, 그리고 콘크리트와 FRP 사이의 부착 특성을 나타낼 수 있는 수치해석기법을 사용한다. 제안된 모델링 기법에 따라, DSFM에 바탕을 둔 2차원 비선형 유한요소해석 프로그램인 VecTor2를 이용하여 유한요소해석을 수행한다. 또한 FRP로 진단보강된 RC 보의 거동에 대한 DSFM의 적용성을 검증하기 위하여 수치해석결과와 실험결과를 상세히 비교한다.

-
- * 정회원, 성균관대학교 건축공학과 건설환경연구소, 책임연구원
 - ** 정회원, 성균관대학교 건축공학과, 박사과정
 - *** 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원, 수석연구원
 - **** 정회원, 성균관대학교 건축공학과, 부교수

1. 서 론

철근콘크리트(RC) 부재의 전단보강 재료로 섬유복합재료(fiber reinforced polymer composites, 이하 FRP)를 사용한 이래, 2000년 이전까지는 FRP 보강재의 기하학적 특성과 역학적 특성에 의한 전단강도 증진에 많은 관심을 가져왔다. 반면에 2000년 이후에는 FRP 이외의 다른 변수, 즉 콘크리트, 횡방향 및 종방향 철근, RC 부재의 기하학적 특성 등이 이들 부재의 전단강도에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 현재까지의 연구는 대부분 FRP로 전단보강된 RC 부재의 강도 예측에 집중되어 왔으며, 변형 예측에 대한 연구는 많지 않다.

이 연구에서는 수정 압축장 이론의 확장된 모델인 DSFM¹(disturbed stress field model)을 사용하여 FRP 시트로 전단보강된 RC 보의 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 여러 가지 모델링 기법을 제안하였으며, 제안된 모델링 기법에 따라 비선형 해석한 결과를 실험결과와 비교하여 FRP 시트로 전단보강된 RC 보에 대한 DSFM의 적용성을 검증하였다.

2. 수치 예제 실험체

이 연구에서는 FRP로 전단보강된 철근콘크리트 보의 전단 거동에 대한 DSFM의 해석결과를 검증하기 위하여 Matsuda 등²이 실험한 총 4개 보를 수치예제 실험체로 하였다. 이 실험체는 표1에서 보는 바와 같이, FRP 보강량을 변수로 하고 있으며, 보강량이 증가함에 따라 전단파괴에서 휨파괴까지 파괴모드가 변화한다. 모든 실험체는 4점 가력을 받는 단순보이며, 전단철근은 배근되지 않았다. 전단보강용 FRP 시트는 실험체의 전단경간 전체를 감쌌다.

모든 실험체의 기하학적인 특성은 동일하며, 단면의 폭과 높이는 각각 400mm와 800mm, 유효높이는 650mm, 전단경간은 2100mm, 전단경간비는 3.2이었다. 콘크리트 압축강도는 30MPa이었으며, 골재 최대직경은 20mm이었다. 인장철근은 항복강도가 345MPa인 D32를 사용하였으며, 인장철근비는 1.83%이었다. 사용한 FRP의 인장강도는 1670MPa, 탄성계수는 1.01×10^5 MPa, 설계유효두께는 0.539mm, 그리고 파단시 변형률은 2.5%이었다.

3. 유한요소해석

이 연구에서는 FRP로 전단보강된 RC 보에 대한 DSFM의 적용성을 검증하기 위하여 DSFM에 바탕을 둔 VecTor2 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 그림1은 유한요소해석을 위하여 예제 실험체를 모델링한 것을 나타낸다. 콘크리트는 사각형 요소를 이용하여 모델링 하였다. 콘크리트 요소는 50mm 정사각형 단면과 보폭을 두께로 가지며, 총 960개의 사각형 요소가 예제 실험체를 모델링 하는데 사용되었다. 철근은 총 120개의 트러스 요소를 이용하여 직접 콘크리트 요소에 연결되도록 모델링 하였다. 본 해석에서는 콘크리트의 압축연화효과, 인장강성효과 및 인장연화효과를 반영하였으며, 각각의 구성관계는 VecTor2에서 제안된 모델³을 사용하였다.

FRP 시트는 총 752개의 트러스 요소로 모델링 하였으며, 부착 연결요소⁴에 의하여 콘크리트와 연결되도록 하였다(그림2). 본 연구에서는 FRP가 RC 보에 래핑된 경우, 그림3(a)에서와 같이 보 옆면의

표1. 예제 실험체의 상세 및 실험결과

실험체	$A_f f_t$ (N/mm)	최대 하중 (kN)	파괴 모드
B-1	0	498	전단
B-2	62	583	전단
B-3	124	646	전단
B-4	991	986	휨

$A_f f_t$ = FRP의 단위폭당 인장강도

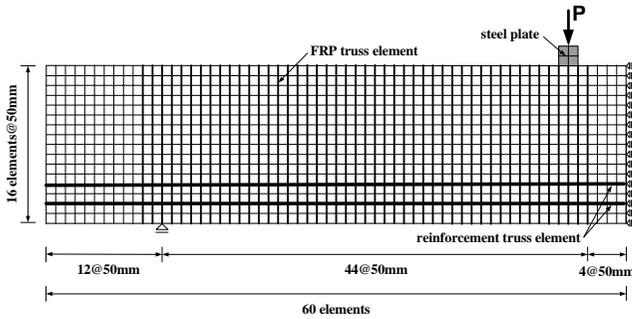


그림 1. FRP로 전단보강된 실험체의 유한요소 모델링

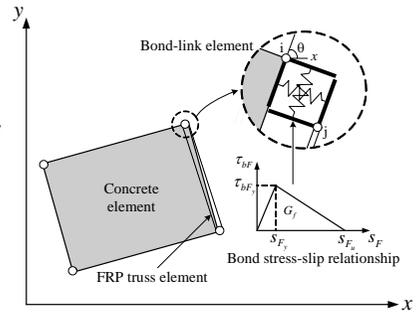


그림 2. FRP 트러스 및 부착요소

양 끝단에 위치한 FRP 요소의 상부와 하부를 각각 RC 보 요소에 직접 연결하여 완전부착이 되도록 하였다. 반면에 FRP가 보 옆면에만 부착된 경우에는 그림3(b)에서와 같이 모두 연결요소를 사용하여 FRP와 RC 보 요소 사이의 부착특성을 고려할 수 있으며, 참고문헌 5에서는 이에 대한 검증을 수행하여 실험결과를 타당하게 예측할 수 있었다. 연결요소의 부착면적은 요소 주위의 FRP 시트에 종속되어 있는 면적에 따라 계산하였다.

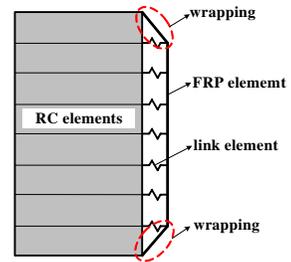
FRP 시트는 취성적으로 파단되는 선형탄성 재료로 가정하였다. 콘크리트와 FRP 사이의 부착응력-슬립 관계는 그림 2에서 보는 바와 같이 Sato와 Vecchio⁶가 제안한 다음 식을 사용하였다.

$$\tau_{bF_y} = (54f'_c)^{0.19} \quad (1)$$

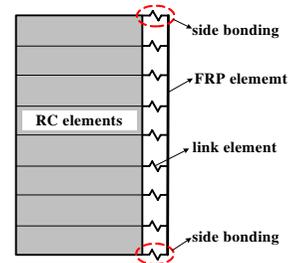
$$S_{F_y} = 0.057G_f^{0.5} \quad (2)$$

$$S_{F_u} = 2G_f / \tau_{bF_y} \quad (3)$$

여기서 τ_{bF_y} 는 최대부착응력, S_{F_y} 는 τ_{bF_y} 에 대응하는 슬립, S_{F_u} 는 극한슬립, G_f 는 콘크리트 파괴에너지로 $G_f = (\tau_{bF_y} / 6.6)^2$ 이다.



(a) FRP 래핑



(b) FRP 옆면 부착

그림 3. FRP 시트의 유한요소 모델링

4. 실험결과와 해석결과의 비교

FRP로 전단보강된 RC 보 예제 실험체에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과를 실험결과와 함께 그림4에 나타내었다. FRP로 전단보강이 되지 않은 B-1 실험체에 대하여, 유한요소해석에 의하여 예측된 파괴모드는 실험결과와 동일하게 전단파괴로 나타났으며, 그림4(a)에서 보는 바와 같이, 실험체의 하중-처짐 관계를 비교적 잘 예측하였다.

FRP 전단 보강량이 비교적 낮은 B-2와 B-3 실험체에 대하여 수치해석을 한 결과, FRP 시트의 파단에 의한 전단파괴로 예측되었으며 이는 실험결과와 동일하다. 또한 그림4(b)와 (c)에서 보는 바와 같이, 해석결과는 FRP 보강량의 증가에 따른 거동의 특성을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

FRP 보강량이 매우 큰 B-4 실험체에 대하여 유한요소 해석결과는 실험결과와 동일하게 인장철근의 항복에 의한 휨파괴로 예측하였다. 따라서 DSFM은 FRP로 전단보강된 RC 보의 전단거동 예측에

타당하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 이 연구에서 사용한 FRP 모델링 기법 또한 유한요소해석에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

1) DSFM을 이용하여 2차원 비선형 유한요소해석을 수행한 결과, FRP 전단 보강량에 따른 RC 보의 파괴모드와 하중응답에 대한 실험결과를 타당하게 예측하였다. 따라서 DSFM은 FRP로 전단보강된 RC 보의 전단해석모델로 타당하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

2) 이 연구에서 사용한 FRP에 대한 모델링 기법은 유한요소해석에 적용될 경우 비교적 간단하면서도 실제 거동을 효과적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

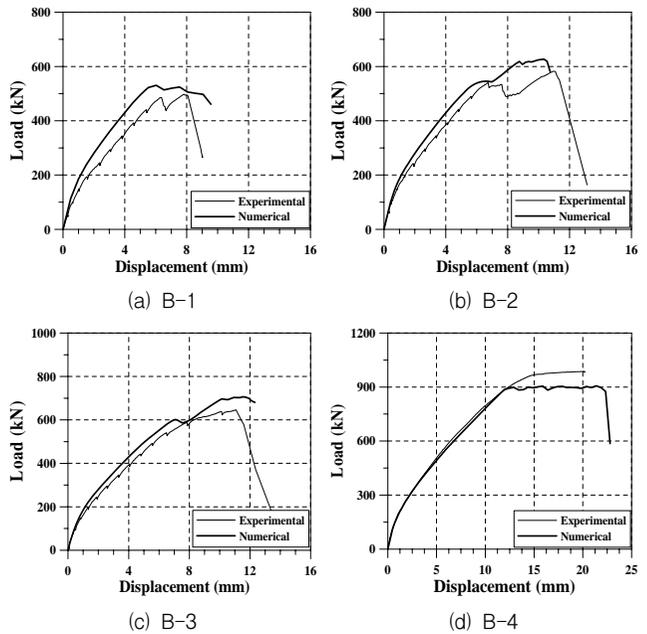


그림4. 실험결과와 유한요소 해석결과의 비교

감사의 글

이 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(05건설핵심 D02-01)과 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-214-D00177)에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. F. J. Vecchio, "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.126, No.9, 2000, pp.1070-1077.
2. A. Matsuda et al, "An Experimental Study on the Shear-Strengthening Effect of RC Piers by FRP Sheets," Proceedings of JCI, Vol.25, No.1, 2003, pp.1541-1546.
3. P. S. Wong and F. J. Vecchio, "VecTor2 and FormWorks User's Manual," Technical Report, Department of Engineering, University of Toronto, Canada, 2002, 217pp.
4. D. Ngo and A. C. Scordelis, "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Proceedings Vol.64, No.3, 1967, pp.152-163.
5. S.-W. Kim and F. J. Vecchio, "Modeling of Shear-Critical Reinforced Concrete Structures Repaired with Fiber-Reinforced Polymer Composites," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.134, No.8, 2008, pp.1288-1299.
6. Y. Sato and F. J. Vecchio, "Tension Stiffening and Crack Formation in Reinforced Concrete Members with Fiber-Reinforced Polymer Sheets," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 129, No.6, 2003, pp.717-724.