

섬유보강 철근콘크리트 보의 전단강도 평가

Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Fiber Reinforced Polymer

황 현 복* 이 정 윤**
Hwang, Hyun-Bok Lee, Jung-Yoon

ABSTRACT

In recent years, the use of fiber reinforced polymer (FRP) composites to repair or strengthen existing reinforced concrete (RC) structures is increasing. In order to evaluate the shear strengths of RC structures strengthened by FRP composites, it is needed to understand the shear failure modes of these structures. This paper presents a rational equation to distinguish the shear failure modes of RC structures strengthened by FRP composites using the compatibility aided truss models.

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시간의 경과에 따른 구조물의 성능 저하, 건축물의 증축 및 용도변경에 의한 하중의 증가, 우발하중에 의한 구조물의 기능상실 등의 문제가 발생하므로 구조물에 대한 보수·보강이 필요하다. 기존의 보수·보강에 사용되고 있는 강판보강법은 구조물과 일체성 확보 및 시공이 어렵고 보강재의 자중이 무거워 취급이 어렵지만, 섬유보강재(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)를 이용한 보강법은 보강재의 자중이 가볍고, 시공이 간편하며, 부식에 강하기 때문에 사용범위가 점차 확대되고 있다.

FRP로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단내력에 대하여 기존 연구자들은 현행 ACI 전단강도식에 섬유에 의한 전단저항분(V_{frp})을 증첩하여 계산하였다. ACI 318-02 기준식에서는 전단을 받는 부재의 취성적 파괴를 방지하기 위하여 전단보강근이 항복한 후에 콘크리트의 압괴에 의하여 부재가 전단내력에 도달할 수 있도록 전단보강근의 양을 제한하고 있다. 따라서 기준식에서는 횡방향 전단보강근의 응력(f_{ts})을 항복응력(f_{ly})으로 대치하여 전단내력(V_n)을 구한다. 그러나 섬유는 콘크리트 압축강도 및 전단보강근의 양에 의하여 파괴모드가 변화하므로 부재가 전단파괴할 때 섬유의 도달 응력(f_{frp})을 파단강도($f_{frp,u}$)로 대치할 수가 없다. 따라서 Chaallal 등¹⁾, Thiantafillou 등²⁾, Khalifa 등³⁾, Teng 등⁴⁾은 실험에 근거하여 섬유의 파단강도에 강도저감계수를 사용하여 전단내력을 평가하였다.

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

이 요소 A의 응력상태를 평형조건을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다

$$0 = \sigma_2^c \sin^2 \alpha + \sigma_1^c \cos^2 \alpha + \rho_t f_{ty} + \rho_{frp} f_{frp} \quad (1)$$

여기서, σ_1^c 를 '0'으로 가정하고, σ_2^c 는 Vecchio와 Collins(1986)에 제안된 연화계수를 사용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_2^c = \zeta f_{ck} = \frac{1}{0.8 + 180 \epsilon_1} f_{ck} \quad (2)$$

콘크리트의 변형률을 모어의 원을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_l = \epsilon_2 \cos^2 \alpha + \epsilon_1 \sin^2 \alpha \quad (3)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_2 \sin^2 \alpha + \epsilon_1 \cos^2 \alpha \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 연립하고, $\epsilon_2 \cong 0$ 를 가정하면 식(5)와 (6)을 구할 수 있다.

$$\sin^2 \alpha = \frac{\epsilon_l}{\epsilon_1} \quad (5)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_l + \epsilon_t, \quad \epsilon_t = \epsilon_{frp} \quad (6)$$

여기서 ϵ_t 는 전단철근의 변형률로 FRP가 파단하여 $\epsilon_t = \epsilon_{frp}$ 과 같다.

식(1)에 식(2)와 (5),(6)을 대입하여 식(7)을 구하였다.

$$\frac{1}{2} f_{rd, max} = \frac{1}{f_{frp}} \left\{ \left(\frac{f_{ck}}{0.8 + 170 (\epsilon_l + \epsilon_{frp})} \frac{\epsilon_l}{\epsilon_l + \epsilon_{frp}} \right) - \frac{1}{2} \epsilon_l f_{ty} \right\} \quad (7)$$

여기서, ³

f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, ϵ_l 는 주인장철근의 변형률(탄성상태, $\epsilon_l \leq \epsilon_y$),

f_{frp} 는 FRP의 인장강도, ϵ_{frp} 는 FRP의 변형률, $\frac{1}{2} \epsilon_l$ 는 전단보강철근량, f_{ty} 는 전단보강철근의 항복강도이다.

파괴모드의 경계점을 구별할 수 있는 최대 FRP량 평가식 (7)은 콘크리트강도, 전단 보강근의 양과 강도, 주인장철근의 변형률, FRP의 강도와 변형률을 고려하였다.

3. 기존 실험결과와 해석결과 비교

표 1은 加藤傳文 등⁵⁾의 FRP로 전단보강된 철근콘크리트 보에 대한 실험결과와 해석결과를 비교한 것이다. 제안식 (7)은 파괴모드③과 파괴모드④의 경계철근량이다. 따라서 FRP보강 철근콘크리트보가 식 (7)의 $\frac{1}{2} f_{rd, max}$ 이상으로 보강될 경우에 파괴모드③이 되며, $\frac{1}{2} f_{rd, max}$ 이하로 보강될 경우에 파괴모드④

표 1. 기존 실험결과와 해석결과 비교

실험체	f_{ck} (kgf/cm ²)	ρ_l (%)	ρ_t (%)	ρ_{frp} (%)	제안식 $\rho_{frp, max}$	전단 강도 (실험)	전단 강도 (해석)	실험 해석	파괴 모드 (실험)	파괴 모드 (해석)	FRP 재로 타입
1	310	2.31	0.422	-	-	12.63	11.96	1.06	-	-	-
2			0.845	-	-	16.48	16.25	1.01	-	-	-
3			-	0.034	0.160	10.25	12.64	0.81	FRP 파단	FRP 파단	고강성
4			-	0.072	0.140	15.95	15.57	1.02	FRP 파단	FRP 파단	고강성
5			0.422	0.072	0.088	16.88	17.64	0.96	FRP 파단	FRP 파단	고강성
6			-	0.144	0.160	16.51	18.45	0.89	FRP 파단	FRP 파단	고강성
7			0.422	0.144	0.100	20.55	19.87	1.03	FRP 파단	FRP 탄성	고강성
8			-	0.074	0.024	14.88	13.42	1.11	FRP 파단	FRP 탄성	고강도
9			0.422	0.074	0.013	16.91	16.11	1.05	FRP 파단	FRP 탄성	고강도
10			-	0.148	0.023	17.88	16.19	1.10	FRP 파단	FRP 탄성	고강도

가된다. 실험에서 측정된 FRP 파단유무와 제안식 (7)에 의한 FRP 파단유무를 표1에 나타내었다. 표에서 고강성 FRP 재료로 보강된 실험체 3, 4, 5, 6의 파괴모드와 해석결과는 일치하였지만, 실험체 7과 고강도 FRP로 보강된 실험체 8, 9, 10의 파괴모드는 해석결과와 일치하지 않았다. 이것은 FRP의 재료적 특징인 고강성 재료와 고강도 재료의 차이로 인하여 실험결과와 해석결과의 파괴모드가 서로 일치하지 않기 때문이다. 한편, 변형률의 적합조건을 이용한 트러스 모델에 의한 전단강도와 실험값은 평균 1.00, 변동계수 9.4%로 잘 일치하였다.

4. 결론

FRP로 전단보강된 철근콘크리트 보의 파괴모드 경계점을 변형률의 적합조건을 이용한 트러스 모델에 의하여 유도하였다. 유도된 식 (7)과 해석결과는 고강성 FRP를 사용한 실험결과와는 일치하였지만, 고강도 FRP를 사용한 실험결과와는 일치하지 않아 이에 대한 추후연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술 연구개발사업(03산학연C103A2000012-03A0200-01220) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Chaallal, O., Nollet, M. J., and Perraton, D., "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced-Plastic Plates: Design Guidelines for Shear and Flexure," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, No. 4, 1998, pp. 692-704.
2. Triantafillou, T. C., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites", *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, 1998, pp. 107-115.
3. Khalifa, A., Tumialan, G., Nanni, A., and Aziz, A., "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, No. 4, 1998, pp. 195-203.
4. Chen, J. F. and Teng, J. G., "Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 5, 2003, pp. 615-625.
5. 加藤傳文, 兒島孝之, 高木宣章, 濱田 讓, "炭素纖維シートによる鉄筋コンクリートはりのせん断補強に関する實驗的研究," *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 101-106.