철근콘크리트용 FRP Box 휨 보강재의 형상 설계 및 거동 평가

권민호¹ · 정우영² · Enrico Spacone³

경상대학교 토목공학과 교수¹, 강릉원주대학교 토목공학과 교수²

³Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, University "G.D'Annunzio" Chieti-Pescara, Italy

Shape Design and Performance Evaluation of FRP Box-type Stiffener For the Application of RC Structure

Kwon, Min-Ho¹ · Jung, Woo-Young² · Spacone, Enrico³

¹Professor, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, South Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju, South Korea

³Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, University "G.D'Annunzio" Chieti-Pescara, Italy

Abstract: This paper presents the design, fabrication and performance of a reinforced concrete beam strengthened by GFRP box plate and its possibility for structural rehabilitations. The load capacity, ductility and failure mode of reinforced concrete structures strengthened by FRP box plate were investigated and compared with traditional FRP plate strengthening method. This is intended to assess the feasibility of using FRP box plate for repair and strengthening of damaged RC beams. A series of four-point bending tests were conducted on RC beams with or without strengthening FRP systems the influence of concrete cover thickness on the performance of overall stiffness of the structure. The parameters obtained by the experimental studies were the stiffness, strength, crack width and pattern, failure mode, respectively. The test yielded complete load-deflection curves from which the increase in load capacity and the failure mode was evaluated.

Key Words: FRP, RC Structure, Composite, Flexural Strengthening, Box Plate

1. 서 론

FRP를 이용한 철근콘크리트 구조물 보강공법은 경량, 고강도이며 부식의 염려가 없고 시공성이 우수한 장점을 가지고 있는 반면에 재료가 콘크리트와 같은 취성재료이며, 시공환경에 많은 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 특히 FRP Plate의 경우 콘크리트와의 부착을 위해 에폭시 도포를 하여 보강을 수행하고 있으며 FRP Plate 자체의 연성 부족으로 콘크리트와 FRP Plate 콘크리트 균열부에서 발생하는 응력집중으로 접착제가 인접한 콘크리트면과 함께 조기 박리파괴가 되는 문제점을 가지고 있다. 또한 FRP가 취성재료이므로 취성적 파괴를 방지하기 위한 한 방법으로 유리

섬유복합재료(GFRP)보다는 고강도의 탄소섬유복합재료(CFRP)를 추가적으로 혼합, 사용하는 경우가 많으나 CFRP의 경우 GFRP에 비해 고가이기에 경제적인 보수보강 공법이라고 할 수 없다. 현재 보수보강 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 기존의 연구들은 보강효과 및 박리파괴에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 취성적 파괴를 억제하기 위한 연구는 부족한 것이 현실이다.

노후화된 철근 콘크리트의 보수보강의 방법에는 여러 가지가 있으나 근래에 들어와서는 FRP를 이용한 보수보강 방법이 주를 이루고 있다. FRP 보수보강에서 고려하여야할 사항은 FRP의 종류, 콘크리트와의 부착방법, FRP의 형상, 보수보강 방법, 피복두께 등 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 피복두께 및

주요어: 섬유강화 복합재료, 철근콘크리트 구조, 복합구조, 휨 보강, 박스형 플레이트

Corresponding author: Jung, Woo-Young

Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukhun-gil, Gangneung, 210-702, South Korea.

Tel: +82-33-640-2421, Fax: +82-33-646-1391, E-mail:woojung@gwnu.ac.kr

투고일: 2012년 12월 12일 / 수정일: 2012년 12월 13일 / 게재확정일: 2013년 1월 18일

FRP 형상을 변수로 선정하여 실험을 실시하였다. 콘크리트의 설계강도 240kgf/cm²의 압축강도를 가지는 배합을 이용하여 철근콘크리트 보를 제작하였으며 피복두께의 변수를 고려하기 위하여 철근 피복두께가 30mm와 50mm가 되도록 제작하였다. FRP의 설계는 J. G. Teng등이 제안한 콘크리트 보의 휨 보강에 관한 식을 이용하여 FRP 보강시편을 제작하였으며, FRP 형상에 따른 변수를 고려하기 위하여 Plate와 Box 형의 시편을 각각 제작하여 실험을 실시하였다.

2. 이론

같은 두께의 표면을 갖는 샌드위치 보의 경우 전단과 휨 변형률은 매우 작거나 무시할 수 있다. 전단응력은 코어의 두께를 통하여 제어할 수 있다. 보의 측면의 경우, 전단과 휨 변형률을 무시할 수는 없다. 보의 한 방향으로 충분히 길다.

보에서 공학적 응력 이론은 매우 쉬우며 적합하여 샌드위치 보를 위해 수정할 수 있다. 전단 처짐은 코어의 두께를 증가시킴으로써 무시할 수 있으며 휨 강성을 산정할 수 있다. 보통의 보 이론을 사용하여 간단한 방법으로 휨 강성 D 를 산정할 수 있으며, 보통의 보에서 D 는 탄성계수를 통하여 구할 수 있다. 샌드위치 보의 D 는 각기 다른 부분의 휨 강성의 합과 같다.

Fig. 1 Dimensions of sandwich beam

$$D = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (1)$$

$$\frac{d}{t} > 5.77 \quad \text{or} \quad \frac{d}{t} > 11.54 \quad (2)$$

$$\frac{E_f}{E_c} \cdot \frac{td^3}{c^3} > 16.7 \quad (3)$$

많은 샌드위치 보가 조건에 만족하지만 너무 많은 예러로 받아들일 수 없는 경우도 있다. 식(2)에 만족하면 휨 강성은

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (4)$$

식(3)을 만족할 경우

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} \quad (5)$$

균일한 두께를 갖는 샌드위치 보의 전단 강성은 다음의 Fig. 2를 통하여 구할 수 있다.

Fig. 2 Shear deformation of beam

$$\frac{dw_2}{dx} = \gamma \frac{c}{d} = \frac{Q}{Gbd} \frac{c}{d} = \frac{Q}{AG} \frac{c}{d} \quad (5a)$$

표면이 충분히 얇다면, c 는 d 와 같고 $w_2' = \gamma$ 면

$$w_2' = \frac{Q}{AG} = \frac{Q}{V} \quad (5b)$$

단순보의 중심에 하중 W 가 작용할 경우 전단력 Q 는 보의 중심의 좌측은 $+W/2$ 되고, $Q=+W/2$ 일때 처짐은

$$w_2 = \frac{W}{2V}x + \text{상수} \quad 0 \leq x \leq L/2 \quad (6)$$

단순보의 최대모멘트 M 과 최대 전단력 Q 를 구한 후 응력과 전단응력을 고려한다.

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f \left(\frac{c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}; -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{c}{2} \right) \quad (6a)$$

$$\sigma_c = \frac{Mz}{D} E_c \left(-\frac{c}{2} \leq z \leq \frac{c}{2} \right) \quad (6b)$$

코어의 전단응력은

$$\tau_c = \frac{Q}{D} \frac{E_f td}{2} \quad (7)$$

처짐은 일반적인 보의 최대 처짐 w_1 전단에 의한

처짐 식 $w_2 = \frac{W}{2V}x$ 을 더하여 구할 수 있다.

$$w = w_1 + w_2$$

본 연구에서는 Sandwich core의 두께 설계에는 식 2을 이용하였으며, $d > 11.54mm \Rightarrow c = 10.54mm$ core의 두께를 10mm이상으로 설계하도록 하였으며, core의 재료로 사용된 우레탄 폼의 최소 두께가 30mm였으며 제작상의 어려움으로 인하여 30mm로 제작하였다.

3. 실험

3.1 실험 계획

4개의 철근콘크리트 보를 제작하였으며, 모든 시험

체는 동일한 배근상황을 가지는 복철근 직사각형 보로 제작하였다. 시험체의 단면은 200mm(폭)×300mm(높이) 시험체 3개와 200mm(폭)×280mm(높이) 시험체 1개이며, 지점간 거리 1920mm로 하고, 전체 길이는 2200mm로 하였다. 피복두께의 경우 50mm로 하였으며, 피복두께 감소 시험체의 보강 단면의 경우에는 피복두께를 30mm로 하였다. 철근은 하부에 2-D13 상부에 2-D10으로 배근하였다. 전단철근은 중앙부 350mm를 제외한 구간에 D10@150 간격으로 배근하였다.

Tabel 1. Specimen type

No	시험 체명	보강재 종류	보강 길이 (mm)	피복 두께 (mm)	비고
1	N	-	-	50	무보강
2	50FP	Plate	1860	50	콘크리트강도 27.2MPa
3	30FP			30	
4	SB	Box		50

Fig. 4 Standard (N)

Fig. 5 FRP Plate (50FP)

Fig. 6 FRP box (SB)

Fig. 7 FRP Plate (30FP)

3.2 실험 방법

실험은 1000kN 대형구조시험기를 사용하여 단순지지 조건하에 대칭으로 3등분점으로 가력 하여 수행하였으며, 각 시험체의 하중상태에 따른 처짐은 시험체의 중앙부에 변위계를 설치하여 처짐을 측정하였으며,

주철근의 휨 변형 상태를 알아보기 위해 철근에 게이지(FLA-5-11-1L)를 부착하였다. 또한 콘크리트 표면 압축부 위치에 콘크리트 게이지(PL-60-11-1L)을 부착하여 변형률을 측정하였다. 하중재하에 따른 변위 및 변형률에 관련된 데이터는 DATA LOGGER (TDS-303)로 저장하였다.

4. 결 과

4.1 하중-처짐 관계 비교

N 시험체의 경우 하중-처짐의 관계가 일반적으로 철근콘크리트 보의 거동을 보이고 있다. 50FP와 30FP의 경우 보강효과에는 큰 차이가 있으나 거의 유사한 형태의 하중-처짐의 관계를 보여주고 있다. N 시험체에 대한 각 시험체별 보강 효과는 50FP의 경우 79% 정도로 가장 우수한 보강효과를 보였으며, 피복두께가 20mm 감소한 30FP의 경우에는 42% 정도의 보강효과를 보여주고 있으며, SB 시험체의 경우 철근콘크리트의 전단파괴 전까지의 보강효과는 38% 정도로 나타났다. 각 시험체별 처짐량 비교의 경우, 50FP 실험체의 경우 27% 감소하였고, SB 실험체의 경우에는 16%의 처짐량이 감소하였다. 하지만 30FP 실험체의 처짐량은 N 실험체와 별다른 차이점은 없었으며, 이는 50FP 실험체와 비교하였을 경우 피복두께의 감소로 인한 전체 단면적 감소가 처짐량에 영향을 준 것으로 판단된다. 각 시험체별 실험결과 및 파괴모드는 Fig. 7 및 Table 2에 나타내었다.

Fig. 8 Load-displacement for specimens

Fig. 9 Load-strain for specimens

Tabel 2. Results of test

시험 체명	항복 처짐 (mm)	극한 처짐 (mm)	항복 하중 (kN)	극한 하중 (kN)	보강 효과*	처짐 량비**	파괴모드
N	3.99	20.32	66.92	100.38	1.00	1	휨 파괴
50FP	5.08	21.40	116.52	179.99	1.79	0.73	휨+중아부 계면 박리파괴
30FP	5.07	21.90	83.90	142.42	1.42	1.01	휨+중아부 계면 박리파괴
SB	4.28	11.04	85.47	138.92	1.38	0.84	휨 전단 균열의 확대에 따른 박리파괴

* : 보강효과는 각 시험체의 극한하중/ N 시험체의 극한하중

** : N 시험체의 항복 시의 처짐량에 대한 각 시험체 동등한 하중을 작용하였을 때의 처짐량을 비교한 값

Fig. 8에 나타난 각 시험체별 하중-변형률의 관계를 비교해 보면 FRP 보강재의 보강으로 인하여 철근의 하중분담 감소에 의한 항복하중이 증가함을 알 수 있으며 철근이 항복에 도달하는 처짐도 FRP 보강재의 보강으로 인하여 그 값이 증가함을 알 수 있었다. 50FP 시험체의 경우 철근의 항복하중이 84% 증가하였고, SB 시험체의 경우 27% 증가하였으며, 30FP의 경우 21%정도 증가한 것으로 나타났다. 이는 FRP 보강재와 철근콘크리트 보가 일체거동을 통하여 철근의 항복 억제에 기여하였기 때문으로 사료된다. FRP 보강재로 인한 강성 증가는 50FP 시험체의 경우 약 47% 정도의 강성 증가를 보였으며, 30FP 시험체의 경우 약 26% 정도의 강성 증가를 보였고, SB 시험체의 경우 약 12% 정도의 강성 증가를 보여주고 있다. 이는 FRP box,형 보강형태에 비하여 플레이트 보강재의 보강능력이 우수하다는 것을 보여주는 예로서 특히 50FP 시험체의 경우 약 1.5배 정도 타 시험체에 비하여 강성이 증가한 것을 알 수 있다.

4.2 균열 및 파괴형태

균열 형태를 Fig. 9부터 Fig. 12에 나타내었다. N 시험체의 경우 무보강에 따른 전형적인 휨 파괴가 발생하였으며, 50FP와 30FP 시험체의 경우 N 시험체와 균열형태는 유사하게 발생하였으며, SB 시험체의 경우 초기 휨 균열이 진행하다 하중 재하 좌측부에서 전단 균열이 발생, 급격히 확대되어 보강재와 콘크리트 계면에 박리파괴가 발생하였다. 이는 Box 형태의 보강재가 실제 plate 형태의 보강재에 비하여 실제 이론적인 측면의 보강재 휨 성능은 우수하나 실제 현장 적용 시 초기 Box형 샌드위치 보에서 나타나는 skin과 core 구성부분간의 interface 분리, 두꺼운 두께에 따른 콘크리트와의 부착문제 등으로 인하여 실제 보강에 따른 효과는 매우 작은 것으로 나타났다.

Fig. 10 Crack pattern for N

Fig. 11 Crack pattern for 50FP

Fig. 12 Crack pattern for 30FP

Fig. 13 Crack pattern for SB

Fig. 14 Crack pattern for specimens

Fig. 15 Load-maximum crack for specimens

4.3 최적 Box형상 설계

본 연구에서는 Box 샌드위치 보의 두께 및 형상에 따른 현장작용의 문제점을 조사하기 위하여 core의 두께 변화에 따른 FRP Plate로 보강된 콘크리트 보와

Sandwich Box로 보강된 콘크리트 보의 거동 변화를 분석하였다. 작용하중 10kN에 대한 FRP Plate로 보강된 콘크리트 보의 경우 0.3488mm로 나타났으며 Box 샌드위치 보강보의 처짐의 경우, core 두께가 3mm, 10mm, 30mm에 대하여 0.3502mm, 0.3488mm 및 0.3512mm로 각각 나타났다. 이를 바탕으로 FRP Plate로 보강된 콘크리트 보와 같은 처짐을 보이는 Box 샌드위치 core의 최적두께를 추적하였으며 그 결과 10mm와 20mm가 나왔으며 이 값들 중 보다 효과적인 10mm를 core 부분의 최적두께로 예상하였다.

Fig. 16 Trend curve for displacement of sandwich box

해석적 연구에 사용된 철근콘크리트 보는 실제 실험체에 의해 실험된 실험값을 이용하여 무보강 철근콘크리트 보, FRP Plate로 보강된 철근콘크리트 보 및 FRP Sandwich Box로 보강된 철근콘크리트 보로 모델링을 구성하여 탄성구간에서의 거동을 예측하여 보고자 ABAQUS를 이용하여 해석을 수행하였다.

Table 3. Results of test

재료	탄성계수 (MPa)	Poisson 비
콘크리트	22,000	0.18
철근	200,000	0.3
FRP	23,000	0.2
우레탄 폼	1.72	0.1

Fig. 17 Modeling for non-retrofitted and FRP plate-retrofitted

Fig. 18 Modeling for FRP sandwich retrofitted

해석 모델은 실험체와의 결과 비교를 위하여 실험체와 동일한 크기로 모델링 하였고, 지점의 경계 조건은 단순보로 하였으며, 하중재하는 3등분점 위치에 Displacement 제어로 재하 하였다.

FRP Plate로 보강된 철근콘크리트 보의 하중-처짐 관계를 비교하여 보면 전반적으로 실험 결과 값이 해석 결과 값보다 높게 나타났지만 처짐이 4mm에 근접함에 따라 점차 수렴해 가는 것을 알 수 있었으며, 무보강 철근콘크리트 모델의 최종 처짐량에 대한 각 해석 모델에 동등한 하중을 작용하였을 때의 처짐량을 비교한 결과 FRP Plate로 보강된 철근콘크리트 모델은 처짐량이 약 22% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 해석 결과는 실험 결과 값과 약간의 차이가 있는데 그 원인은 FRP Plate로 보강된 철근콘크리트 모델의 해석결과 값이 실험결과 값보다 실제적으로 낮게 나타남으로써 처짐량이 증가한 것처럼 나타나는 현상이 발생한 것으로 보인다.

FRP Sandwich Box로 보강된 철근콘크리트의 하중-처짐 관계를 비교하여 보면 실험 결과 값과 해석 결과 값이 탄성구간에서 거의 일치하며 이를 바탕으로 처짐량을 비교한 결과 FRP Sandwich Box로 보강된 모델이 약 17% 정도 감소한 것을 알 수 있었다. 해석 결과는 실험 결과 값과 일치하는 것을 알 수 있었다.

(a) Non-retrofitted

Fig. 19 Analysis result

Fig. 20 Result of experiment and analysis

5. 결론

FRP 보강 시 FRP Box 샌드위치 보강재의 형상과 피복두께의 변화에 따른 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 피복두께의 감소는 콘크리트의 보의 거동에는 별다른 영향을 주지 않으며, 설계변수로 부적합한 것으로 사료된다.

2) FRP 보강재의 형상에 따라서는 Box 형태보다 Plate 형태의 보강재가 보강성능이 우수한 결과를 보여주었으며, 이는 FRP Box 보강재 제작상의 한계점 및 core 재료가 너무 약하여 FRP box 보강재의 Top Plate와 Bottom Plate가 일체화 거동을 하지 못하여 나타난 결과로 사료된다.

3) 파괴 패턴은 휨에 의한 균열로 인해서 보가 파괴됨을 관측하였으며, 균열은 보의 중앙 가력점 사이에서 주로 발생하였다. 50FP와 30FP 시험체의 경우 휨 균열 + 박리파괴가 발생하였다. 하지만 SB 시험체의 경우 초기 휨 균열 발생 후 급격한 전단 균열의 발생으로 인한 휨 전단 균열 확대에 의한 박리파괴가 발생하였다.

4) 무보강 철근콘크리트 모델의 최종 처짐량에 대한 각 해석 모델에 동등한 하중을 작용하였을 때의 처짐량을 비교한 결과 FRP Plate로 보강된 철근콘크리트 모델은 처짐량이 약 22% 정도 감소하는 것을 알 수 있었고 그 원인은 FRP Plate로 보강된 철근콘크리트 모델의 해석결과 값이 실험결과 값보다 낮게 나와 처짐량이 증가한 것처럼 나타나는 현상으로 사료된다. FRP Sandwich Box로 보강된 철근콘크리트의 하중-처짐 관계를 비교한 결과 FRP Sandwich Box로 보강된 모델이 약 17% 정도 감소한 것을 알 수 있었다.

결론적으로 FRP로 철근콘크리트 구조물을 보강할 경우 기존의 연구결과들에서 보듯이 상당한 내력 증진효과를 기대할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 FRP Box의 core 두께 변화에 따른 거동 평가에 대한 연구가 필요하리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. [No. 2012-0008762].

References

- Sim, J. S., Kim, G. S., Lee, S. M., and Kim, K. M. (1998). "A Experimental Study on the Flexural Characteristics of RC Beams Strengthened by GFRP." *Korea Concrete Institute Spring Research Meeting Collection Of Dissertations*, pp. 559-565.
- Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002). "FRP: strengthened RC structures." *FRP: Strengthened RC Structures*, by JG Teng, JF Chen, ST Smith, L. Lam, pp. 266. ISBN 0-471-48706-6. Wiley-VCH, January 2002., 1.
- Yoo, S. W. and Bae, H. U. (2007). "Bond Slip Behavior Between Cast-In-Place Concrete and FRP Plank Used as Permanent Formwork and Tensile Reinforcement." *Korean Society of Civil Engineers Collection Of Dissertations*, Vol. 27, No. 1A, pp. 69-77.