

탄소섬유쉬트로 전단보강한 RC 기둥의 이력성능평가에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Hysteretic Capacity Evaluation of the Shear-Strengthened RC Column with Carbon Fiber Sheet

이 현 호*
Lee, Hyun Ho

구 은 숙**
Koo, Eun Sook

ABSTRACT

When the RC frame structures subjected to the seismic load, brittle shear failure of vertical members induces brittle collapse of whole structures. Failure mechanism like this is not desirable. So shear strengthening method to avoid this failure mechanism is needed. Recently, strengthening method using continuous fiber sheet is studied and used widely which have high elastic and high strength characteristics. In this study, RC columns which is strengthened by carbon fiber sheet in the form of tape or whole sheet were tested under the cyclic load. The parameter of this test is the amount of strengthening. As the amount of strengthening increases, strength, ductility and energy capacity increase. The failure mode of test results are shear and bond-split failure.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

지진과 같은 수평하중을 받는 철근콘크리트 골조구조물에서 수직부재인 기둥의 취성적인 전단 파괴는 건물 전체의 붕괴를 유발할 수 있으며, 이러한 붕괴 기구는 바람직하다고 할 수 없다. 따라서 기둥의 전단파괴를 방지하기 위한 전단보강공법이 필요하다고 할 수 있다. 그러나 우리나라에서는 단면증설 또는 철판보강 등의 강도증진 보강방법이 사용되고 있으나 수평하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 강도 및 변형능력을 향상시킬 수 있는 전단보강공법의 개발은 미흡한 실정이다. 최근 일본에서는 고탄성·고강도인 연속섬유재료에 의한 전단보강공법이 사용성의 편리로 인하여 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 탄소섬유로 전단보강된 철근콘크리트 기둥의 내력 및 변형능력 증진 효과를 구조성능실험을 통하여 평가하고자 한다.

1.2 기존 연구

片岡隆廣 외 3인¹⁾은 1996년에 쉬트 형태의 연속섬유로 전단부강한 RC기둥의 구조성능을 실험하여 섬유쉬트의 보강량을 평가하는 다음의 세 가지 식 중 쉬트의 파단강도와 전단보강근의 항복

* 정희원, 현대건설기술연구소, 선임연구원

** 현대건설기술연구소, 연구원

강도비에 의해 슈트를 보강근으로 환산하는 식(3)이 부재의 구조성능을 가장 잘 평가할 수 있음을 발표하였다.

$$\sum p_w = p_w + f_p p_w \quad (1) \quad \sum p_w = p_w + \frac{f E}{s E} \times f_p p_w \quad (2) \quad \sum p_w = p_w + \frac{f \sigma_u}{\sigma_y} \times f_p p_w \quad (3)$$

여기서, p_w 는 전단보강근비, $f_p p_w$ 는 섬유슈트의 보강비, $f E$ 및 $s E$ 는 각각 섬유슈트 및 전단보강근의 탄성계수, σ_y 는 전단보강근의 항복강도, $f \sigma_u$ 는 섬유슈트의 인장강도를 나타낸다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

실험체는 우리규준의 극한강도 설계법²⁾에 의해 설계하였으며, 기둥의 단면은 30×30 cm, 높이는 90 cm 이다(그림 1 참조). 탄소섬유슈트를 테이프 형태로 보강한 것이 3개, 슈트 형태로 전체 보강한 것이 1개, 기준이 되는 비보강 실험체가 1개로 총 5개의 실험체를 계획하였다. 테이프의 폭은 모두 4 cm로 하였고 간격은 10 cm, 20 cm, 40 cm의 세 가지로 하였다(표 1 참조).

표 1. 실험체 일람

실험체	보강 형태	보강 간격	보강 폭
RC-200A	비보강 실험체		
CF4-400	tape	40 cm	4 cm
CF4-200	tape	20 cm	4 cm
CF4-100	tape	10 cm	4 cm
CFS-0	sheet	0 cm	90 cm

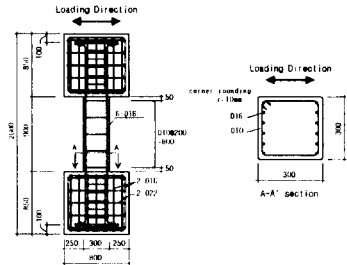


그림 1. 실험체 상세

2.2 재료강도

사용 콘크리트의 압축강도는 평균 267.14 kg/cm², 탄성계수 E_c 는 2.49×10^5 kg/cm²이며, 철근의 탄성계수는 2.17×10^6 kg/cm², 항복강도는 4189 kg/cm², 인장강도는 평균 5306 kg/cm²이다. 탄소섬유슈트의 탄성계수는 2.60×10^6 kg/cm², 인장강도는 35,000kg/cm², 두께는 0.165 mm 이다³⁾.

2.3 가력 및 측정

실제 구조물의 축력에 의한 구속효과를 고려하기 위하여 공칭축하중의 20%(50.38 ton)를 일정하게 가력하였으며, 수평하중을 기둥상부 경계면에서 점진적으로 가력하였다(그림 2 참조). 또한 가력 수평하중이력은 표 2와 같다. 기둥 머리부분과 기초부분의 회전각, 기둥의 축방향 변위 및 수평방향 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 설치하였다. 주근, 전단보강근 및 섬유슈트의 변형도를 알아보기 위하여 스트레인 게이지를 설치하였다.

3. 실험결과

3.1 강도

탄소섬유슈트로 전단보강한 기둥 실험체의 주근 항복하중, 전단보강근 항복하중, 최대하중 및 파괴시 하중과 그때의 변위를 표3에 나타내었다. 비보강 실험체는 스텝 19 즉, $R=1/25$ rad에서 최대하중에 도달하였으며, 보강 실험체 중에서 CF4-400은 스텝 23 즉, $R=1/15$ rad에서, 그 외 다른 보강 실험체는 모두 스텝 25 즉, $R=1/10$ rad에서 최대하중에 도달하였다.

표 2. 수평하중 이력

스텝	회전각 (rad)	변위 (mm)	스텝	회전각 (rad)	변위 (mm)	스텝	회전각 (rad)	변위 (mm)
1	1/400	2.3	9	1/67	13.4	17	1/33	27.3
2	-1/400	-2.3	10	-1/67	-13.4	18	-1/33	-27.3
3	1/200	4.5	11	1/67	13.4	19	1/25	36.0
4	-1/200	-4.5	12	-1/67	-13.4	20	-1/25	-36.0
5	1/100	9.0	13	1/50	18.0	21	1/20	45.0
6	-1/100	-9.0	14	-1/50	-18.0	22	-1/20	-45.0
7	1/100	9.0	15	1/50	18.0	23	1/15	60.0
8	-1/100	-9.0	16	-1/50	-18.0	24	-1/15	-60.0
						25	1/10	90.0

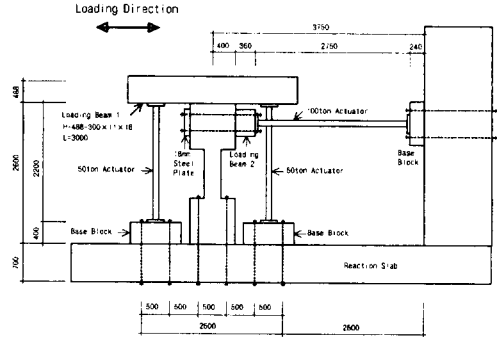


그림 2. 가력 상황

표 3. 실험 결과

실험체	주근 항복		전단보강근 항복		최대하중		파괴하중	
	Q_{mv} (ton)	δ_{mv} (mm)	Q_{sv} (ton)	δ_{sv} (mm)	Q_u (ton)	δ_u (mm)	Q_{max} (ton)	δ_{max} (mm)
RC-200A	7.59*	8.53*	-	-	12.05	35.80	10.40	44.95
CF4-400	8.46*	8.78*	-	-	15.76	58.80	15.58	60.05
CF4-200	9.63	10.65	-	-	22.20	73.05	22.20	73.05
CF4-100	8.49*	9.15*	16.51	66.70	18.34	71.15	18.34	71.15
CFS-0	8.06	17.13	23.20	77.83	23.20	77.83	22.41	80.20

* 스트레인 게이지 계측 실패(하중-변위 곡선으로 예측)
 - 항복하지 않음

3.2 하중-변위 곡선

하중-변위 곡선을 그림 3에 나타내었으며, 주근 및 전단보강근이 항복한 시점 및 최대하중인 지점을 같이 나타내었다. 비보강 실험체인 RC-200A는 스텝 19에서 최대하중 12.05 ton을 기록한 후 한 사이클을 더 진행한 후 실험이 종료되었다. 그러나, 보강 실험체들은 거의 마지막 스텝에서 최대하중을 기록하였다. 보강량이 증가함에 따라 실험시 진행된 스텝 수의 증가는 거의 없었다. 하중-변위 곡선 중 탄소섬유를 보강한 실험체는 파괴하중 이후 주근의 항복에 앞서 부착파괴가 발생한 부착파괴의 이력 특성(이력 루프의 끝 부분이 튀어서 휘어지는 특성)이 나타났다.

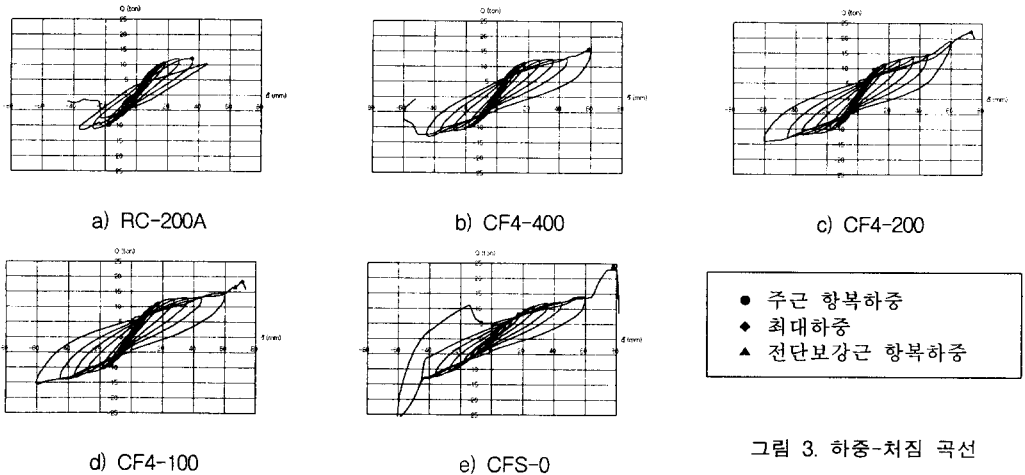


그림 3. 하중-처짐 곡선

4. 성능 평가

4.1 실험결과 평가

반복하중을 작용한 실험결과에 의하면 (+) 및 (-)하중에 대한 이력 곡선은 거의 유사하게 나타나, (+)방향에 대해서만 평가하기로 한다. 성능평가시 CFS-0 실험체는 실험장치의 이상으로 인하여 여러번 실험이 중단되어 실험결과에 소성변형 결과가 포함될 수 있으므로, 하중특성에 대한 결과만을 사용하기로 한다.

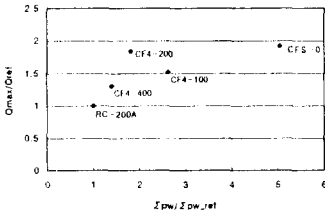


그림 4. 최대하중비

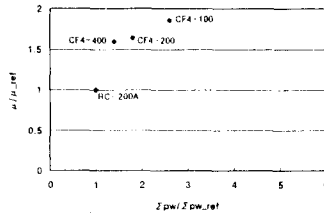


그림 5. 연성능력비

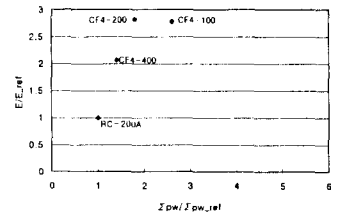


그림 6. 에너지능력비

4.1.1 강도능력

그림 4에 비보강 실험체에 대한 보강 실험체의 최대강도비를 세로축에, 식(3)으로 구한 보강 및 비보강 실험체의 전단보강비를 가로축에 나타내었다. 최대하중이 12.05 ton인 비보강 실험체인 RC-200A에 대하여 CF4-400은 31%, CF4-200은 84%, CF4-100은 52%, CFS-0은 93% 증가하는 것으로 나타나, 탄소섬유슈트 보강에 의해 수평내력이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 최대하중에 있어 CF4-200 실험체의 강도능력이 보강량이 많은 CF4-100 실험체보다 크게 나타났다. 즉 수직 및 수평하중을 받는 기둥 실험체의 경우 휨, 전단 및 부착파괴 등이 같이 발생할 수 있으므로, 특정 파괴거동에 대하여 보강하더라도 다른 파괴거동에 의하여 실험체가 파괴될 수 있으므로, 이는 기둥의 적정 전단보강량과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정할 수 있다. 이러한 경향은 탄소섬유슈트를 전면 보강한 CFS-0 실험체의 최대내력이 CF4-200에 비해 1 ton 밖에 증가하지 않은 것에서도 알 수 있다.

4.1.2 연성 및 에너지 능력

그림 5에 비보강 실험체의 연성도에 대한 보강 실험체의 연성도의 비를 전단보강비에 대해서 나타내었다. 여기서 연성도 μ 는 최대하중시의 변위 (δu)에 대한 항복시의 변위 (δy)의 비로 정의한다. 비보강 실험체인 RC-200A의 연성비는 4.2로, 보강 실험체 CF4-400은 6.7, CF4-200은 6.9, CF4-100은 7.8로 나타나 평균 70% 정도의 연성증진효과가 있는 것으로 나타났다.

에너지흡수능력의 평가는 강성의 변화가 크지 않았던 실험결과를 근거로 포락선 상에서 최대하중에 대한 에너지면적으로 간단히 정의하여 평가하였다. 그림 6에 비보강 실험체에 대한 보강 실험체의 에너지능력의 비를 전단보강비에 대해서 나타내었다. 비보강 실험체인 RC-200A의 에너지흡수능력은 1.3 ton-m로, 보강 실험체인 CF4-400, CF4-200, CF4-100은 각각 2.69, 3.67, 3.62 ton-m로 나타나 평균 56%의 에너지능력의 증가가 있는 것으로 나타났다. 그리고 CF4-200 실험체에 비해 보강량이 많은 CF4-100 실험체는 CF4-200과 거의 유사한 에너지능력을 나타나, 전단보강량과 부재의 강도, 연성, 에너지능력과는 상호연관된 관계가 있는 것으로 판단된다.

4.2 파괴양상 평가 및 기존 내력식의 적용성 평가

수직하중 및 수평하중을 받는 기둥의 경우, 휨 및 전단보강량 그리고 작용 축력의 크기에 의하여

파괴양상이 크게 좌우된다.

표 4. 최대 수평 및 회전변형

Specimen	δ'_{max}	$\delta_{\theta max}$	$\delta'_{max}/\delta_{\theta max}$
RC-200A	8.15	5.62	1.45
CF4-400	17.72	10.27	1.72
CF4-200	-18.90	-15.42	1.23
CF4-100	20.01	15.37	1.30

4.2.1 변형능력에 의한 평가

본 연구에서는 실험진행시 측정된 회전변형 및 수평변형 및 최종파괴형태로 본 실험결과의 파괴양상을 구분하고자 한다. 기둥의 상대수평변위(δ')에 대한 최대회전변형($\delta_{\theta max}$)을 비교하기 위하여 기둥 부재의 최대회전변위에 대한 최대수평변위(δ'_{max})비를 표 4에 나타내었다. 표 4에 의하면 수평 대 회전변형비($\delta'_{max}/\delta_{\theta max}$)는 비보강 실험체인 RC-200A가 1.45, 그리고 보강 실험체인 CF4-400, CF4-200, CF4-100은 각각 1.72, 1.23, 1.30으로, 회전변형보다 수평변형이 평균 1.43 정도 큰 것으로 나타났다. 따라서 본 실험결과는 휨 모멘트보다 전단력이 크게 작용하는 것으로 추정할 수 있으므로, 본 실험체는 휨과 전단이 동시에 작용하다가 전단+부착할렬 파괴로 최종파괴에 도달한 것으로 추정할 수 있다.

4.2.2 기존 내력식의 적용성 평가

이상과 같이 탄소섬유쉬트 보강기둥 실험체의 파괴양상은 전단 및 부착할렬파괴로 구분할 수 있다. 이러한 파괴양상의 영향을 고려하기 위해서 전단내력식 및 부착내력식을 본 연구결과에 적용하여 그 적용가능성을 평가하고자 한다. 내력평가에 사용된 전단내력식(Q_u)⁴⁾은 廣澤(Hirosawa)의 전단내력식을 수정한 것으로 식(4)와 같다. 일본 건축학회의 부착내력식(Q_{BO})⁴⁾은 식(5)를 이용하였다. 각 식을 이용하여 계산한 각 실험체별 내력 및 우리규준의 강도설계법에 의한 내력(Q_{design})²⁾과 실험결과(Q_t)에 대한 비를 표 5에 나타내었다.

(1) 廣澤(Hirosawa)의 수정 전단내력식⁴⁾

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.0679 \cdot \rho_t^{0.23} \cdot (180 + f'_c)}{M/Qd + 0.12} + 2.7\sqrt{\rho_w \sigma_{wy} + \alpha \rho_{wf} \sigma_{wf}} + 0.1 \cdot \sigma_0 \right\} \cdot b \cdot j \quad (4)$$

여기서, M/QD 는 전단스팬비, σ_0 는 축방향 응력도, f'_c 는 콘크리트의 압축강도, ρ_t : 인장철근비, ρ_w 는 전단보강근비, σ_{wy} 는 전단보강근의 항복강도, ρ_{wf} 는 섬유쉬트 보강비, σ_{wf} 는 섬유쉬트의 인장강도, α 는 섬유쉬트의 강도조정계수, b 는 기둥의 폭, j 는 모멘트 거리이다.

(2) 일본건축학회의 부착내력식⁴⁾

$$Q_{bo} = \gamma \left(\tau_b \sum \psi_{jt} + \frac{\tan \theta (1 - \beta) b D \nu f'_c}{2} \right) \quad (5)$$

$$\tau_b = (1.2 + 5 \rho_w' \cdot b / d_b) \sqrt{f'_c} \quad \tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$$

$$\beta = \frac{\tau_b \cdot \sum \psi}{(b \cdot \sin \phi \cos \phi) (\nu \cdot f'_c)} \quad \rho_w' = \rho_w + \alpha \cdot \rho_{wf} \cdot \frac{\sigma_{wy}}{\rho_{wf}}$$

여기서, ϕ 는 주근의 둘레 길이, b , D 는 기둥의 폭 및 전체 춤, j_t 는 주근의 중심거리, L 은 기둥 주근의 직경, ν 는 콘크리트 압축강도 유효계수 (= $0.7 \cdot f'_c / 2000$), f'_c 는 콘크리트의 압축강도, d_b 는 주근의 직경, ρ_w 는 전단보강근비, σ_{wy} 는 전단보강근의 항복강도, ρ_{wf} 는 섬유쉬트 보강비, σ_{wf} 는 섬유쉬트의 인장강도, α 는 섬유쉬트의 강도조정계수, γ 는 보강효과 조정계수이다.

표 5에 의하면, 비보강 실험체의 최대내력은 전단내력식이 잘 예측하고 있는 것으로 나타났으며, 탄소섬유쉬트로 보강한 실험체의 경우, 전단내력식은 보강 실험체의 내력을 다소 낮게, 부착내력식 및 우리규준에 의한 내력식은 다소 높게 평가하는 것으로 나타났다. 또한 비보강 실험체를

제외한 보강 실험체의 실험 내력에 대한 계산 내력의 비는 전단내력식의 경우 23% 낮게, 부착내력식의 경우 28% 높게, 그리고 설계식의 경우 13% 높게 평가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 실험결과를 안전측으로 평가한 廣澤(Hirosawa)의 전단내력식에서 섬유슈트의 강도조정계수 $\alpha=2.3$ 으로 적용하면 보강 실험체의 내력을 잘 예측하는 것으로 나타났다(그림 7참조). 그림 7에 의하면 실험 결과가 다소 크게 나온 CF4-200 실험체를 제외하면 조정계수 $\alpha=2.3$ 을 사용한 Hirosawa의 전단내력식이 탄소섬유슈트의 보강효과를 잘 예측하는 것으로 평가된다. 따라서, 보강재의 구속효과를 고려할 수 있는 보강효과 조정계수를 사용하여 탄소섬유슈트로 보강된 철근콘크리트 기둥 실험체의 최대내력을 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

표 5. 실험결과대 기존내력식 비교 (ton)

Specimen	Q_{test}	Q_u	Q_{test}/Q_u	Q_{BO}	Q_{test}/Q_{BO}	Q_{design}	Q_{test}/Q_{design}
RC-200A	12.05	11.70	1.03	18.71	0.64	15.58	0.77
CF4-400	15.76	13.74	1.15	25.59	0.62	21.12	0.75
CF4-200	22.20	14.04	1.58	23.87	0.93	22.12	1.00
CF4-100	18.34	15.12	1.21	23.77	0.77	23.55	0.78
CFS-0	23.20	13.38	1.26	29.08	0.80	23.80	0.97

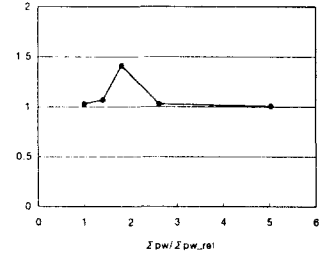


그림 7. 수정된 Hirosawa의 전단내력식($\alpha=2.3$)

5. 결론

탄소섬유슈트로 전단보강된 철근콘크리트 기둥의 이력성능평가에 대한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 탄소섬유슈트로 전단보강된 기둥 실험체와 비보강 실험체에 대한 강도, 연성, 에너지능력을 평가한 결과, 보강량이 증가함에 따라 강도, 연성, 에너지능력은 증가하였으나 일정 보강량을 초과하면 뚜렷한 능력의 증진은 없는 것으로 판단된다.
- (2) 기둥 실험체의 파괴양상은 휨, 전단, 부착파괴 등이 포함되어 나타나므로 파괴양상의 정확한 구분이 어려우나, 정확한 파괴양상의 구분은 실험체의 내력을 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서, 실험체의 최종파괴상태, 항복기구, 측정된 변위·변형도 기록에 의해 파괴양상을 평가한 결과, 본 기둥 실험체의 파괴양상은 전단 및 부착할렬파괴로 판명되었다.
- (3) 전단 및 부착에 대한 기존내력식 및 우리규준에 의한 내력을 실험결과와의 비로 그 적용가능성을 평가한 결과, 보강효과 조정계수 $\alpha=2.3$ 을 적용한 廣澤(Hirosawa)의 전단내력식으로 탄소섬유슈트로 전단보강된 철근콘크리트 기둥의 최대내력을 추정 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 이상의 결과는 본 실험결과에 국한하며, 강도, 연성, 에너지능력 등의 보강 목표에 따른 적정 보강량의 산정 및 보강재의 구속효과에 대한 보완 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 片岡隆廣 외 3인, “슈트狀 連續纖維에 의해 剪斷補強된 RC 기둥의 構造性能에 關한 實驗的 研究”, 일본콘크리트공학 연차논문보고집, Vol.18, No.2, 1996
2. 김상식, “철근콘크리트 구조설계”, 문운당, 1996.15
3. 이현호 외, “탄소섬유슈트와 아라미드섬유슈트로 보강한 보의 휨 성능 비교 연구”, 대한건축학회논문집, 14권 12호, 1998.12.
4. 日本建築學會構造委員會, “連續纖維補強材의 콘크리트構造에의 應用”, 일본건축학회, 1998.9.11

감사의 글

본 연구에 사용된 보강재료 및 시공은 (주)청조엔지니어링이 제공한 것으로 이에 밝힙니다.