탄소섬유 앵커 X-브레이싱으로 보강된 철근콘크리트 기둥의 구조거동 및 내진보강 효과

심종성¹⁾ · 이강석²⁾ · 권혁우¹⁾ · 김현중^{1)*}

¹⁾한양대학교 건설환경공학과 ²⁾전남대학교 건축공학과

Retrofitting Effects and Structural Behavior of RC Columns Strengthened with X-Bracing Using Carbon Fiber Anchor

Jongsung Sim,¹⁾ Kang-Seok Lee,²⁾ Hyuck-Woo Kwon,¹⁾ and Hyun-Joong Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

ABSTRACT This paper presents a new strengthening method on concrete column against seismic loads for structural performance tests. An X-bracing using high performance carbon fiber threads called the “Carbon fiber anchor X-bracing system” is used to connect RC frames internally. The carbon fiber sheet is wrapped around the column to fix the top and bottom of the column after Super anchor was installed by drilling hole on the column. The structural performance was evaluated experimentally and analytically. Two types of columns specimens were made; flexure fracture scaled model and shear fracture scaled model. For the performance evaluation, cyclic loading tests were conducted on moment and shear resisting columns with and without X bracing. Test results confirmed that the bracing system installed on RC columns enhanced the strength capacity and provided adequate ductility.

Keywords : carbon fiber, carbon fiber anchor, X-bracing, RC column

1. 서 론

노후화된 콘크리트 구조물의 성능 향상을 위한 여러 가지 보수·보강공법은 지속적으로 발전해왔다. 특히, 새로운 건설재료인 fiber-reinforced polymer(이하 FRP)를 이용한 보강공법은 섬유 재료의 특성을 활용하여 다양한 방식으로 콘크리트 구조물의 성능을 향상시켜 생애주기 동안 좀 더 경제적이고 안정적인 성능을 확보할 수 있는 방법으로 주목받고 있다. 따라서 최근 건설 구조물에 FRP를 이용한 보수·보강방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 연구 결과를 살펴보면 FRP를 이용한 다양한 방식의 보수·보강공법은 기존의 단면을 증설하는 공법의 단점인 중량 증가 문제와 공간 확보 및 품질관리의 어려움을 극복할 수 있는 공법으로 알려져 왔다.¹⁻³⁾ 그러나 FRP를 이용한 대부분의 단면 보수공법은 노후화된 콘크리트 구조물의 거친 표면을 처리하기 위한 사전준비가 필수적이며 재료의 가격이 고가이기 때문에 초기 비

용 증가라는 경제적인 문제점과 더불어 섬유 특성과 방향에 따라 보강효과가 크게 달라지는 문제로 인해 시공 전 많은 고려사항이 발생할 수 있는 단점을 내포하고 있다. 또한, 단순 외부부착공법의 경우 구조물의 극한강도를 증가시키나 공법의 원리 상 사용하중 수준에서의 균열하중 증가나 항복하중의 증가는 미미한 수준이며, 특히 균열폭과 변형의 억제는 기대할 수 없는 문제점 역시 밝혀진 바 있다.⁴⁾

기존 래핑에 의한 내진 보강방법은 연성 보강효과는 우수하나 강성 보강효과가 작아 건축물에서 층간 변위를 제어할 수 없는 단점이 있다. 이를 보완할 수 있는 보강 공법으로서, 브레이싱 내진 보강에 대한 연구가 진행되어왔으며 그 활용도 및 효용성이 많은 연구자들에 의해 검증되어왔다. 강재 브레이싱에 대한 연구로는 4, 8, 12, 16층 3D RC 구조모델을 사용하여 기본 시험체, 경사 브레이싱, X 브레이싱을 적용한 지진해석을 수행하였다. 해설결과, X 브레이싱을 적용한 구조모델이 상대적으로 최소의 횡변위 및 압축 휨 모멘트를 발생시키는 것으로 그 효용성이 검증되었다.⁵⁾ 또한, 브레이싱 시스템의 성능개선을 위한 연구로는 모멘트저항 골조와 철골 브레이싱이 적용된 골조에 대한 실험적 연구를 통해 브레이싱

*Corresponding author E-mail: oldcloud@hanyang.ac.kr

Received February 20, 2012, Revised May 9, 2012,

Accepted May 22, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

보강경우가 외부 지진력에 대해 강도 및 연성측면에서 우수한 지진저항성능을 보이는 것으로 평가되었다.⁶⁾ 특히, RC 구조물과 브레이싱이 철골 프레임에 의해 간접적으로 접합된 브레이싱 구조시스템의 결점으로 파악되어 브레이싱을 RC 구조물과 직접적으로 연결될 수 있는 X 브레이싱 구조시스템을 제안하였다.^{7,8)} 반면, 강재 브레이싱 내진보강은 연결부파괴 및 브레이싱 좌굴문제가 내진보강 안전도를 가능하는 척도로 붕괴방지상태에 대해서는 좌굴안전성에 대한 신뢰지수가 부족한 것으로 분석하였다.⁹⁾ 이러한, 정착부의 안정성 문제와 브레이싱의 국부좌굴이 발생할 문제가 있으며 이를 방지하기 위한 추가보강으로 인해 불필요한 자증증가 등으로 경제적인 내진보강성능 확보의 어려움이 있다.

따라서, 이 연구에서는, X-브레이싱 내진보강 시스템의 장점을 충분히 확보하면서, 기존 철골 X-브레이싱 내진보강 시스템에 비해 경량의 고강도 재료로 보강 후 추가적인 질량증가가 거의 없을 뿐 아니라, 브레이싱 압축 좌굴거동에서 자유로운 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 공법에 관한 내진보강효과를 평가하였다.

2. 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 보강공법의 특징

해외에서는 X자 형태의 스틸이나 강봉을 이용한 내진보강 효과에 대한 연구를 진행하고 있으나^{5,6)} 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 공법은 국내에서 최초로 개발된 방법으로 Fig. 1과 같이 탄소섬유 앵커를 기둥을 관통하여 X자 형태로 시공하고, 기둥 상부를 에폭시로 고정시킨 후 하단부를 긴장한 상태에서 앵커를 방사형으로 펼쳐서 기둥을 단면을 감싸면서 에폭시로 고정시키고, 기둥을 감싸서 앵커를 보호하기 위해 두께 1 mm, 탄소섬유시트 1겹을 기둥 상, 하단에서 높이 300 mm까지 보강하였다. 탄소섬유 앵커가 초기부터 RC 기둥의 하중을 분담할 수 있도록 탄소섬유 앵커에 10 kN의 긴장력을 도입하였다.

탄소섬유 앵커 X-브레이싱 보강공법의 장점은 기존 댄퍼 보강 및 철골 브레이스 보강법과 비교하여 표면처리 등의 사전준비가 간단하며 중량 증가가 거의 없는 것이 특징이다. 또한 재료 자체가 경량이므로 시공성이 매우 우수하고 중량 및 체적대비 우수한 강도가 발휘되며, 탄소섬유의 직경을 변경함으로써 목적에 대응하여 성능을

Fig. 1 Carbon fiber anchor X-bracing

쉽게 변화시킬 수 있는 장점이 있다. 더불어 가장 큰 장점은 인건비 및 시공성이 탁월하여 기존 댄퍼 보강 및 철골 브레이스 보강법 대비 전체공사비의 30~40% 절감이 가능할 것으로 사료된다. 따라서, 기존의 보수·보강에 비해 시공성, 구조성능, 경제성이 우수한 장점을 갖고 있다.

3. 시험 개요

3.1 사용 재료 및 특성

이 시험에 사용될 기둥 실험체는 콘크리트는 압축강도 30 MPa로, 3개의 공시체 평균값으로 표준공시체 보정값은 측정된 압축강도의 97%로 28일 평균압축강도 31.8 MPa를 확인하였다.

철근의 경우 항복강도 400 MPa로 전단 파괴형 기둥의 주근은 D22, 전단 보강근은 D10@200을 사용하였으며, 휨 파괴형 기둥의 주근은 D16, 전단 보강근은 D10@70을 사용하였다. 이음성능 평가 실험체에 사용된 철근의 재료적 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편)의 ‘라’호의 규정에 따라 철근 인장시험편을 각각 3개씩 제작하여 만능시험기(UTM)를 이용하여 가력속도 5 mm/min로 인장시험을 진행하였다. 시험 결과 철근의 항복강도와 인장강도는 D10의 경우 평균 518 MPa, 752 MPa, D16의 경우 평균 472 MPa, 700 MPa, D22의 경우 평균 538 MPa, 726 MPa로 나타났다.

탄소섬유 앵커 X-브레이싱 공법에 사용된 탄소섬유 앵커는 총 2가지의 재료를 사용하였으며, Type-1은 미국에서 제품으로 생산되는 앵커를 사용하였으며, Type-2는 국내에서 탄소섬유 원사를 배열하여 동일한 인발력으로 제작한 고강도의 탄소섬유 앵커를 사용하였다. 인장강도는 공인시험기관에 의뢰하여 Table 1과 같은 성능을 확인하였다. 탄소섬유 앵커를 래핑하기 위한 탄소섬유 및 에폭시 복합재의 재료 물성은 Table 2와 같다.

3.2 기준 실험체의 내하력 평가

내진보강에 대한 효과를 검증하기 위한 기준 실험체 제작을 위해 내하력을 평가하였다. 내하력 평가를 위해 일본건축학회(AIJ)에서 제안하고 있는 규준식을 이용하여 보강전 휨파괴 실험체와 전단파괴 실험체의 내력을 산정하였다.

휨부재의 평균 축방향 응력은 3 MPa로서 시험시 사용할 콘크리트 강도 30 MPa의 10% 강도를 사용하였으며 부재의 폭에 대한 높이비인 $R_h = S/D$ 는 6.0로 모든 실험체에 동일하게 적용하였다. 재료의 경우 시험을 통해 콘크리트의 압축강도는 30 MPa로 철근의 항복강도는 400 MPa로 가정하였다.

휨 실험체는 폭 250 mm와 두께 250 mm로 제작하여 주철근 D16으로 10개를 배근하였고, 스티럽은 2단으로 D10철근을 간격 70 mm로 배근하였으며 전단실험체의 경

Table 1 Mechanical properties of carbon fiber

	Carbon fiber	
	Type-1	Type-2
Shape of tensile test
Tensile force (N)	3,100	2,272
Tensile modulus (GPa)	230	230
Weight (g/m)	3.273	1.761
Tensile force (kN)	310	454

Table 2 Mechanical properties of carbon fiber composite

Mechanical properties of carbon fiber composite				
Product	Design tensile strength (GPa)	Density (kg/m ³)	Tensile strength (GPa)	Elongation at break (%)
Carbon fiber	3.79	1,740	230	1.7
Mechanical properties of epoxy resin				
Product	Compressive strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Density (kg/m ³)
Epoxy resin	88	80	2,800	1,160
Mechanical properties of carbon fiber composite and epoxy resin				
Product	Design tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Thickness (mm)
Composite	745	61.5	1.0	1.0

우 스티럽을 200 mm로 배근하였다. 가정된 휨 부재의 순수 휨강도 및 전단강도는 AIJ 규준의 식 (1)을 이용하여 산정하였으며 산정 결과는 Table 3과 같다. 산정 결과 휨 부재의 경우 순수휨강도는 226 kN이며 순수전단강도는 212 kN을 확인하였다.

$$Q_s(N) = \left(\left(\frac{0.053 \times (p_t)^{0.23} \times (17.6 + f_{ck})}{\frac{M}{Q \cdot d} + 0.12} \right) + 0.845 \sqrt{p_w f_u} + 0.1 \cdot f_0 \right) D \cdot j \quad (1)$$

where,

- p_t = Tension steel ratio
- f_{ck} = Concrete compressive strength
- p_w = Shear reinforce ratio
- f_0 = Strength of axial load

Table 3 Test result of capacity of specimen

Specimen	N (kN)	Q (kN)	Q_s (kN)	Q_f (kN)
CF-0	187.5	421.68	268	226
CS-0	187.5	416.68	212	301

- D = Sectional size
- j = 0.8D
- Q_s = Shearal load capacity
- Q = Flexural load capacity

3.3 실험체 제작 및 변수

탄소섬유 앵커 X-브레이스 공법의 내하력 평가를 위해 탄소섬유 앵커 X-브레이스로 보강된 전단 파괴형 기둥 2개와 무 보강 전단 파괴형 기둥 1개를 제작하였다. 또한, 휨 파괴형 기둥 2개와 무보강 휨 파괴형 기둥 1개를 각각 제작하여 총 6개의 실험체를 Table 4와 같이 제작하였다.

실험체는 기둥 단면이 가로와 세로 250 mm로 정방형으로 계획하였으며, 기둥의 길이는 1,500 mm로 전단 경간비는 6으로 제작하였다. 기둥 상부에는 스티브를 설치하여 기둥의 구속 효과가 고려될 수 있도록 하였다. 스티브의 형상은 높은 강성에 의해 기둥 거동에 영향을 주지 않는 형태를 선택하였으며 시험 시 집중하중에 의한 균열 및 국부 변형이 생기지 않도록 철근 보강을 실시하였다.

실험체 제작 및 보강의 순서는 Fig. 2와 같이 거푸집

Table 4 Test variable

Specimen	H (mm)	C1=C2 (mm)	S/D	ρ_s (%)	ρ_w (%)	Type of reinforcement	
						Type of anchor	Type of FRP
CF-0	1500	250	6	2.48	3.18	NA	NA
CS-0	1500	250	6	1.27	0.82	NA	NA
CF-1	1500	250	6	2.48	3.18	Type-1	CFRP 1 layer
CS-1	1500	250	6	1.27	0.82		CFRP 1 layer
CF-2	1500	250	6	2.48	3.18	Type-2	CFRP 1 layer
CS-2	1500	250	6	1.27	0.82		CFRP 1 layer

Name of specimen	C	F S	0 1 2	① Test method (C: cycling) ② F: flexural failure S: shear failure ③ 0: non-reinforcement 1: carbon fiber anchor type-1 2: carbon fiber anchor type-2
	①	②	③	

H: column height, C1=C2: column dimensions, S/D: span-to-depth ratio, ρ_s : flexural reinforcement ratio, ρ_w : shear reinforcement ratio

Fig. 2 Test specimen

제작, 철근 가공, 변형을 게이지 부착, 철근 조립, 콘크리트 타설, 양생, 보강의 순서로 진행하였다.

거푸집의 경우 철판을 이용하여 제작하였으며, 거푸집의 이동 및 콘크리트 타설 측압에 의한 거푸집의 변형을 방지하기 위하여 D10 철근을 용접하여 거푸집의 외부 모서리를 고정하였다. 또한 스티브를 바닥에 고정하고, 가력 장치에 연결용 홀을 위하여 파이프를 매설하였다.

Table 5 Test equipment

Classification	Equipment	Volume	Amount
Loading	Actuator	2,000 kN	1
	Oil jack	1,000 kN	2
Measure	LVDT	100, 200, 300 (mm)	7
	Strain gauge	FLA-2-1L-11	111
Data	Data logger	SDS303 (30ch)	1
	Switch box	50ch	1

Fig. 3 Test specimen (unit: mm)

Fig. 4 Test method

3.4 시험 방법

시험에 사용된 시험기기 및 장치는 Table 5와 같으며 Fig. 4와 같이 축력의 경우 $0.1f_{ck}A_g$ 인 187.5 kN을 실험체 양쪽에 설치된 1,000 kN 오일잭을 이용하여 가력하였으며, 반력벽에 설치된 2,000 kN 가력기를 이용하여 변위 제어 방식으로 수평하중을 가력하였다. 실험체에 역대칭 모멘트가 발생하도록 횡력을 가하는 가력기의 가력점을 실험체의 중심에 일치시켰으며, 횡 변위는 수평 부재각에 따라 휨 파괴형 실험체 1/500, 1/250, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/37.5, 1/25, 1/17.65, 1/13.64, 전단 파괴형 실험체 1/1000, 1/500, 1/333.33, 1/250, 1/200, 1/150, 1/120, 1/100, 1/85.71, 1/75, 1/60, 1/50까지 Table 6과 같이 각각 3 cycle씩 단계별로 점증 가력하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 파괴 양상

4.1.1 무보강 휨파괴형 실험체

무보강 실험체(CF-0)는 휨 파괴 모드의 기준이 되는 실험체로서 3 cycle(R = 1/500)의 부가력 8.0 kN에서 좌측

기둥 하단부에서 미세한 휨 균열이 발생하였으나 중앙부에서는 균열이 전혀 발생하지 않았다. 15 cycle(R = 1/100)의 정가력 185 kN에서 기둥 상부 중앙에 초기 전단균열이 발생하였으며 부재각이 증가되면서 휨 균열이 점점 커지는 양상을 보였다. 24 cycle(R = 1/37.5)에서는 전단 균열 수가 증가되면서 폭 1 mm를 넘는 휨 균열이 다수 발생하면서 기둥하부에 압괴가 발생하는 양상을 보였다.

28 cycle(R = 1/17.6)의 최대하중 240 kN에서 양단부에 휨 균열의 폭이 점차 커지면서 콘크리트 피복이 박리되었으며 기둥의 상부에 소성힌지가 형성되면서 Fig. 5(a)와 같이 실험체가 최종 파괴되었다.

4.1.2 무보강 전단파괴형 실험체

무보강 실험체(CS-0)는 전단파괴 모드의 기준이 되는 실험체로서 15 cycle(R = 1/200)의 부가력 16.6 kN에서 우측 기둥하단에서 미세한 휨 균열과 기둥상부에서 전단균열이 관찰되었고, 기둥중앙부에서는 균열이 전혀 발생하지 않았다. 21 cycle(R = 1/120)의 부가력 224 kN에서 전단균열이 증가되는 양상을 보였으며 정가력시 마찬가지로 전단균열이 증가하였다. 부재각이 증가되면서 전단균

Table 6 Test cycle

Cycle	1~3	4~6	7~9	10~12	13~15	16~18	19~21	22~24	25~27	28~30	31~33	34~36
Flexural joint translation angle	1/500	1/250	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/37.5	1/25	1/17.6	1/13.6	Finish
Lateral displacement (mm)	3.0	6.0	7.5	10	15	20	30	40	60	85	110	-
Shear joint translation angle	1/1000	1/500	1/333	1/250	1/200	1/150	1/120	1/100	1/85.7	1/75	1/60	1/50
Lateral displacement (mm)	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	10	12.5	15	17.5	20	25	30

(a) CF-0

(b) CS-0

(c) CF-1

(d) CS-1

Fig. 5 Failure of specimen

열이 점점 커지고, 전단균열 수가 증가되면서 폭 1 mm을 넘는 전단균열이 다수 발생하였고, 27 cycle($R = 1/85.7$)에서 양단에서 중앙부로 연결되는 전단균열이 관찰되었으며 양단부로 이어지는 균열의 증가와 함께 피복의 박리가 발생하였다. 29 cycle 부가력에서 최대하중 278 kN으로 더 이상의 하중 증가는 관찰되지 않았으며, 36 cycle ($R = 1/50$)에서 Fig. 5(b)와 같이 실험체가 최종 파괴되는 양상을 보였다.

4.1.3 X-브레이스 보강 휨파괴형 실험체

탄소섬유 앵커를 X-브레이스 형태로 보강하고, 긴장 후 기둥 양단부를 탄소섬유 복합재로 랩핑하여 보강한 CF-1, 2 휨 실험체의 경우 가력 후 평균 6 cycle($R = 1/250$)에서 기둥 상하단부 탄소섬유복합재로 랩핑한 부분에서의 균열은 없었으나 랩핑 경계면에서 미세한 휨 균열이 관찰되었다. 평균 21 cycle($R = 1/50$)에서 탄소섬유 앵커 X-브레이스가 뽑히는 파괴 양상을 보였으며 평균 최대하중 317 kN의 31 cycle($R = 1/13.6$)에서 Fig. 5(c)와 같이 최종 파괴되는 양상을 보였다.

4.1.4 X-브레이스 보강 전단파괴형 실험체

탄소섬유 앵커를 X-브레이스 형태로 보강하고, 기둥 양단부를 탄소섬유복합재로 랩핑하여 보강한 CS-1, 2 전단 실험체의 경우 가력 후 평균 18 cycle($R = 1/150$)에서 기둥 상하단부 탄소섬유복합재로 랩핑한 부분은 균열을 확인할 수 없었으나, 탄소섬유를 랩핑한 경계면에서 미세한 전단 균열 다수 발생하는 것을 확인하였다. 평균 24 cycle($R = 1/100$)에서 탄소섬유 앵커 X-브레이스가 뽑히는 파괴 양상을 보였으며, 평균 최대하중 347 kN의 36 cycle($R = 1/50$)에서 Fig. 5(d)와 같이 최종 파괴되는 양상을 보였다.

4.2 하중-변위 곡선

시험 결과 항복하중은 휨파괴형 실험체의 경우 무보강 시 195 kN인데 반해 탄소섬유 앵커 보강시 CF-1은 250 kN, CF-2는 275 kN으로 복원력은 81 kN 정도까지 증가하는 것을 알 수 있으며, 전단 파괴형 실험체의 경우, 무보강시 240 kN인데 반해 탄소섬유 앵커 보강시 CS-1은 295 kN, CS-2는 342 kN으로 복원력이 102 kN까지 증가한

Table 7 Test result

Specimen	V_y (kN)	Δ_y (mm)	V_u (kN)	Δ_u (mm)	μ (Δ_u/Δ_y)	k_y (kN/mm)	k_u (kN/mm)	Failure
CF-0	194	17.0	240	59.0	3.47	11.4	4.06	Flexure failure
CF-1	250	15.0	295	23.7	1.58	16.7	12.45	Flexure failure & X-bracing slip
CF-2	275	22.0	339	59.8	2.72	12.5	5.67	Flexure failure X-bracing slip and CFRP delamination
CS-0	240	14.0	278	17.5	1.25	17.1	15.89	Shear-flexural failure
CS-1	295	15.0	344	24.3	1.62	19.7	14.16	Shear-flexural failure & X-bracing slip
CS-2	342	20.0	386	26.3	1.32	17.1	14.68	Shear-flexural failure & X-bracing slip

Note: V_y : Yield load, Δ_y : Yield strain, V_u : Maximum load, Δ_u : Maximum displacement, μ : Ductile ratio, k_u : Stiffness (V_u/Δ_u)

Fig. 6 Load-displacement curve

(a) Envelope of CF series

(b) Envelope of CS series

Fig. 7 Load - displacement envelope

복원력의 크기는 탄소섬유 앵커 강도의 18~22%로 일정하게 나타났다.

실험 결과는 Table 7과 같으며 각각의 실험체의 하중-변위 곡선을 Fig. 6에 나타냈으며 Fig. 7에서는 부재 변형각 $R = 1/13.6 (\delta = 110)$ 까지의 정가력 포락선을 나타내었다. 또한, 최대 변위(δ_u)는 최대 강도점의 변위로 각각 정의하였다.

응력-변형률 곡선을 살펴보면 대부분의 보강 실험체는 6 cycle($R = 1/75$) 부근에서 항복하는 것을 확인하였다. 휨 파괴형 기준 실험체(CF-0)는 9 cycle($R = 1/25$)에서 270 kN의 최대 내력을 보였고, 전단 파괴형 기준 실험체(CS-0)는 9 cycle($R = 1/85.7$)에서 278 kN의 최대 내력을 보였다.

탄소섬유 앵커를 X-브레이스 형태로 보강한 휨 파괴형 실험체 CF-1는 7 cycle($R = 1/50$)에서 295 kN의 최대 내력을 보였으며, CF-2의 경우, 9 cycle($R = 1/25$)에서 339 kN의 최대 내력을 보였다. 또한 전단 파괴형 실험체 CS-1는 7 cycle($R = 1/120$)에서 344 kN의 최대 내력을 보였으며, CS-2의 경우, 12 cycle($R = 1/50$)에서 386 kN의 최대 내력을 보였다.

휨 파괴형 실험체 CF-1, CF-2의 경우 휨 파괴형 기준 실험체 대비 약 10~26% 높은 최대 강도를 나타내었으며, 탄소섬유 앵커를 X-브레이스 형태로 보강한 전단 파괴형 실험체 CS-1, CS-2의 경우 전단 파괴형 기준 실험체 대비 약 25~40% 높은 최대 강도를 나타내었다. 변위 연성비($\mu = \Delta_u/\Delta_y$)는 기준 실험체(CF-0)보다 CF-1, CF-2가 약 46~22% 감소하였고, CS-1, CS-2는 4~30%로 연성능력이 증가하였다. 초기 탄성비는 Type-1 앵커 보강시에는 증가하므로 보강효과가 상쇄되나, Type-2 앵커 보강시에는 무보강의 초기 탄성비와 비슷하므로 고강도 탄소섬유 앵커를 사용하는 것이 보강효과 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

4.3 연성비와 내력비의 비교 분석

항복점을 결정하기 위한 방법으로 Park Method를 이용하였으며, 최대하중에서의 변위에 대한 항복할 때의 변

위비를 연성비로 사용하였다.

$$\mu_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad (2)$$

여기서,

$\mu_{\max}$: Displacement ductile ratio of maximum load

$\Delta_{\max}$: Displacement of maximum load

Δ_y : Displacement of failure load

실험체의 연성비에 따른 내력차이를 비교하기 위해 부재의 항복점 및 최대내력점에서 내력과 수평 변위를 이용하였다. 휨실험체와 전단실험체의 각각에 대한 연성비와 강도비를 분석한 결과 휨파괴형 실험체는 강도비가 감소하나, 전단 파괴형 실험체는 강도비가 비슷하게 나타나는 것을 확인하였다. 강도비의 감소는 탄소섬유 앵커의 슬립으로 인해 강도저하가 급격히 일어나면서 발생한 것으로 판단된다. 연성비는 휨파괴형 실험체의 경우 기준실험체 대비 보강실험체의 연성도가 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 기둥에 탄소섬유시트 래핑에 의해서 수평하중에 대한 휨 내력의 상승폭이 전단내력 상승폭에 비해서 다소 크기 때문에, 즉 연성률을 결정하는 주요한 물리적인 지표인 전단여유도(전단내력/휨내력)가 휨파괴형 보강 실험체(CF-1, CF-2)에서 다소 감소하였기 때문이라고 사료된다. 반면, 전단 실험체의 경우 기준 실험체 대비 보강실험체의 연성률이 증가함을 알 수 있었다. 이는 탄소섬유 앵커를 시공시 양단부를 탄소섬유로 래핑하면서 기둥의 연성능력이 증가된 것으로 판단된다.

전단 실험체의 경우 연성률이 증가하는 경향을 보였다. 이는 기둥의 극한변위가 무보강시 17.5 mm에서 24.3 mm로 약 1.4배 증가한 것은 탄소섬유 앵커 보강 효과보다는 앵커를 보호하기 위해 탄소섬유로 기둥의 소성힌지 부위를 래핑하면서 기둥의 연성능력이 증가한 것으로 사료된다. 실험체의 복원력 특성을 이용하여 휨 부재의 항복점을 기준으로 부재의 연성비에 대한 강도비의 관계를 비교한 결과 전단내력이 큰 보강실험체에서 연성비에 대

한 강도비가 크다는 점을 알 수 있다.

4.4 보강효과 분석

휨 파괴형 기준 실험체(CF-0)의 정가력시 극한강도가 222 kN으로 일본건축학회(AIJ)에서 따라 산정한 중국강도 226 kN과 일치하는 것으로 평가되었으며, 전단 파괴형 기준 실험체(CF-0)의 정가력시 극한강도가 227 kN으로 일본건축학회(AIJ)에서 따라 산정한 중국강도 212 kN과 거의 비슷한 것으로 평가되었다.

휨 파괴형 기준 실험체(CF-0)는 9 cycle($R = 1/25$)에서 240 kN의 최대내력을 보였고, 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 형태로 보강한 휨 파괴형 실험체 CF-1은 7 cycle($R = 1/50$)에서 295 kN의 최대내력을 보였으며, CF-2의 경우, 9 cycle($R = 1/25$)에서 339 kN의 최대내력을 보였다. 탄소섬유 앵커 X-브레이싱으로 내진보강한 휨 파괴형 실험체 CF-1, CF-2의 경우 휨 파괴형 기준 실험체 대비 약 10~26% 높은 최대 강도를 나타내었으며, 변위 연성비는 기준실험체보다 CF-1, CF-2가 약 0.54 및 0.78배 감소하였다. 실험 결과에서 탄소섬유 앵커 X-브레이싱으로 강도와 강성은 증가하는 반면 연성은 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 8에서는 누적변형에너지를 비교하였다. CF-0에 대해서는 횡방향 변위 85 mm(부재각 5.7%)에서 최종파괴로 실험이 중지될 때까지 누적변형에너지가 69,477 kN·mm 인데 반해, 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 형태로 보강한 CF-1, CF-2의 누적변형에너지는 각각 87,394 kN·mm, 88,447 kN·mm으로 약 1.26배 정도 에너지를 흡수할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 보강 실험체를 부재각 7.3%에서 최종 파괴시까지 가력시험을 한 결과 CF-1은 151,850 kN·mm,

CF-2는 133,608 kN·mm로 약 1.9에서 2.2배까지 에너지를 흡수하는 것으로 평가되었다. 이는 탄소섬유 앵커가 중국 파단시까지 에너지 흡수에 기여하는 것으로 판단된다. 전단 파괴형 기준실험체 CS-0에 대해서는 횡방향 변위 30 mm(부재각 2.0%)에서 최종파괴로 실험이 중지될 때까지 누적 소산에너지가 20,719 kN·mm이며, 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 형태로 보강한 CS-1, CS-2의 누적변형에너지는 각각 24,204 kN·mm, 23,045 kN·mm으로 약 1.1배 정도 에너지를 흡수할 수 있는 것으로 나타났다.

전단 파괴형 기준실험체는 9 cycle($R = 1/85.7$)에서 278 kN의 최대내력을 보였다. 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 형태로 보강한 CS-1은 7 cycle($R = 1/120$)에서 344 kN의 최대내력을 보였으며, CS-2의 경우, 12 cycle($R = 1/50$)에서 386 kN의 최대내력을 보였다. 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 형태로 보강한 전단 파괴형 실험체 CS-1, CS-2의 경우 전단 파괴형 기준 실험체 대비 약 25~40% 높은 최대 강도를 나타내었다.

5. 결 론

이 연구에서는 시공성과 경제성 및 현장적용이 우수한 탄소섬유 앵커 X-브레이스 공법의 구조성능과 내진성능을 평가하기 위해 시험을 실시하여 결과를 분석한 연구로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 휨 파괴형 실험체는 CF-0와 비교하여 CF-1은 23%, CF-2는 41%의 강도 증가효과와 강성 증가에 따른 연성 감소 효과를 보이는 것으로 나타났다.
- 2) 국내에서 제작한 고강도 탄소섬유 앵커의 경우 강성증가 없이 시험체의 강도가 증가되는 결과를 나타내어 지진력의 증가 없이도 내진 보강 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 3) 휨 파괴형 실험체의 경우 탄소섬유 앵커 X-브레이싱으로 보강된 기둥의 누적 소산에너지는 중국 파단 시 기준실험체 대비 약 2배 정도까지 에너지를 흡수할 수 있는 것으로 평가되었다. 따라서 탄소섬유 앵커가 기둥의 중국시까지 에너지흡수에 기여하고 있는 것으로 사료된다.
- 4) 전단 파괴형 기둥실험체의 경우 CS-0와 비교하여

Table 8 Ductile ratio and strength ratio

Specimen	$P = V_{\max}/V_y$	$\mu_{\max} = \Delta_{\max}/\Delta_y$	$P/\mu_{\max}$
CF-0	1.34	3.47	0.39
CS-0	1.18	1.25	1.06
CF-1	1.23	1.58	0.72
CS-1	1.16	1.62	0.82
CF-2	1.17	2.72	0.49
CS-2	1.13	1.32	1.02

Fig. 8 Accumulated energy dissipation

CS-1은 24%, CS-2는 39%의 강도 증가를 보이는 것으로 나타났으며 연성비는 약 50% 정도 증가되는 결과를 통해 X-브레이싱으로 보강된 기둥은 전단 파괴에 적합한 보강방법으로 분석된다.

- 5) 향후, 신뢰성과 타당성을 검증하기 위해 해석적 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 (주)콘크리닉 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박종섭, 박영환, 유영준, 정우태, 강재윤, “부착 또는 비 부착된 탄소판으로 긴장 보강된 RC 보의 보강성능,” 콘크리트학회 논문집, 17권, 1호, 2005, pp. 279~282.
2. 심종성, “철근콘크리트 구조물의 보수·보강 신기술 개발,” 연구보고서, R&D 94-0039, 한양대학교, 1996, pp. 17~34.
3. 오홍섭, 심종성, 주민관, “탄소섬유 보강재로 표면매립에 의해 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 보강성능,” 구조물

진단학회지, 12권, 3호, 2008, pp. 84~94.

4. Jones, E. A. and Jirsa, J. O., “Seismic Strengthening of a Reinforced Concrete Frame Using Structural Steel Bracing,” Report on a Research Project, National Science Foundation, 1986, pp. 63~77.
5. Viswanath, K. G., Prakash, K. B., and Desai, A., “Seismic Analysis of Steel Braced Reinforced Concrete Frames,” *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2010, pp. 114~122.
6. Youssef, M. A., Ghaffarzadeh, H., and Nehdi, M., “Seismic Performance of RC Frames with Concentric Internal Steel Bracing,” *Engineering Structures*, Vol. 29, Issue 7, 2007, pp. 1561~1568.
7. Maheri, M. R. and Sahebi, A., “Experimental Investigation on the Use of Steel Bracing in Reinforced Concrete Frames,” *Proceedings of the Second International Conference on Seismic and Earthquake Engineering*, Iran, 1995, pp. 775~784.
8. Maheri, M. R. and Sahebi, A., “Use of Steel Bracing in Reinforced Concrete Frames,” *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, 1997, pp. 1018~1024.
9. Chang, H. Y. and Chiu, C. K., “Performance Assessment of Buckling Restrained Braces,” *Procedia Engineering*, Vol. 14, 2011, pp. 2187~2195.

요 약 이 논문에서는 콘크리트 기둥에 새로운 보강방법을 제시하여 반복하중에 대한 구조적인 성능시험을 하였다. 두 개의 콘크리트 기둥에 고성능 탄소섬유 다발을 이용하여 X자 형태의 보강을 실시하고, 기둥의 내부에 X-브레이싱을 고정하기 위해 기둥 단면을 천공하여 탄소섬유 다발을 기둥에 삽입한 후 탄소섬유로 단부를 감싸주는 새로운 보강방법인 탄소섬유 앵커 X-브레이싱 보강공법을 이용해 콘크리트 기둥의 구조성능과 보강효과를 시험을 통하여 규명하였다. 이를 위해 탄소섬유로 보강된 휨 파괴형 실험체 기둥과 전단 파괴형 실험체 기둥을 축소모형으로 각각 제작하였다. 휨과 전단저항 기둥에 대해 X-브레이스 보강 유, 무 실험체에 반복하중시험을 통해 기둥의 연성과 강도 보강효과를 확인하였다.

핵심용어 : 탄소섬유, 탄소섬유 앵커, X-브레이스, 철근콘크리트 기둥