탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 콘크리트로 보강한 콘크리트 보의 구조성능 평가

Evaluation of Structural Performance of Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets and No-Slump Concrete

유선재* · 원천봉** · 홍세희*** · 윤영수****

Yoo, Sunjae*, Yuan, Tianfeng**, Hong, Sehee***, and Yoon, Youngsoo****

Abstract

In this study, the compression and tensile sections of existing concrete were reinforced using carbon fiber sheet (CFS) and no-slump high-strength, ductility concrete (NSHSDC) to evaluate the structural response of the reinforced concrete. From the experimental test results, the CFS showed a low energy dissipation ability when reinforced at both the compression and tensile sections. However, the NSHSDC reinforcement exhibited high energy dissipation and the lowest deflection under maximum load at both the compression and tension sections. The NSHSDC without reinforcement in the compression section, and concrete reinforced with CFS, exhibited lower load resistance and concrete compression failure. Furthermore, a linear relationship between the compression reinforcement and structural performance was observed, which demonstrated the high load resistance and excellent structural performance of the member reinforced with NSHSDC at both the compressive and tensile sections.

Key words : Carbon Fiber Sheet, No Slump Concrete, Reinforcement, Load Resistance, Ductility

요 지

본 연구에서는 콘크리트의 압축부 및 인장부 보강에 따른 구조적 거동을 평가하기 위하여 탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트를 기존 콘크리트에 보강하였다. 실험결과, 탄소섬유 시트를 콘크리트의 압축부 및 인장부에 모두 보강한 부재에서 낮은 에너지 소산 능력을 보였다. 그러나 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트를 압축부 및 인장부에 모두 보강한 부재는 최대하중 작용 시 가장 적은 처짐을 보였으며, 높은 에너지 소산 능력을 보였다. 탄소섬유 시트 및 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트로 압축부를 보강하지 않을 시 최대하중 시 높은 처짐 및 콘크리트 압축파괴가 발생하였다. 최종적으로 콘크리트 압축부 보강과 구조성능 사이의 선형관계를 확인하였으며, 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트로 압축부 및 인장부 모두 보강한 부재에서 우수한 하중 저항 및 구조성능을 보였다.

핵심용어 : 탄소섬유 시트, 노 슬럼프 콘크리트, 보강, 하중 저항능력, 연성

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail: redtoss@korea.ac.kr)

Member, Master's Course, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사 후 연구원(E-mail: yuantianfeng@korea.ac.kr)

Member, Postdoctoral Researcher, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: bestshhong@korea.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3320, Fax: +82-2-3290-5999, E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 내력 저하가 발생한다. 따라서 노후된 콘크리트의 내력 증진이 필요하며, 적절한 보수 보강이 요구된다. 이에 에폭시 주입 공법(Epoxy Injection) 및 아스팔트 덧씌우기 공법(Direct-Asphalt Overlay)과 같은 보강이 진행되었다(Back and Jang, 2006; Hwang and Lee, 2007). 하지만 이러한 보강 방법들은 보강재의 낮은 강도로 인해 실제 구조물에 쉽게 적용할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 Fiber Reinforced Polymer (FRP) 및 섬유를 혼입한 시멘트 복합체를 이용한 보강에 관한 연구가 진행되고 있다(Park et al., 2002; Ko, 2006).

많은 연구자는 강성이 큰 탄소섬유 시트(Carbon Fiber Sheet, CFS)를 콘크리트 표면에 부착하여 콘크리트 강도를 증가시키는 연구들을 진행해왔다(Cho et al., 2010; Kim et al., 2011). CFS는 콘크리트와의 부착이 쉬울 뿐만 아니라, 무게 대비 높은 강도를 지니기 때문에 활용 가능성이 큰 것으로 평가되고 있다. 이는 CFS 제조 시 섬유함량이 높아, 다른 보강재에 비해 높은 탄성계수를 갖기 때문이다. 이 밖에도 아라미드 섬유 강화 플라스틱(AFRP), 하이브리드 섬유 강화 플라스틱(HFRP) 등 보강재를 콘크리트 외부에 보강하여 구조적 성능을 평가하는 연구들이 진행되고 있다(Attari et al., 2012).

한편, 현재 고성능 섬유 보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, HPFRCC)는 높은 강도를 가져, 이에 관한 연구가 활발히 진행 중이며 광범위하게 적용되고 있다(Naaman and Reinhardt, 2003; Kim et al., 2015). 이러한 HPFRCC 중에서 노 슬럼프 고강도 고연성 콘크리트(No Slump High Strength Ductility Concrete, NSHSDC)는 높은 점성으로 인해 기존 콘크리트와의 부착성이 우수하며, 하중 저항 및 연성 효과가 우수한 것으로 평가되고 있다(Yuan et al., 2019). 이는 NSHSDC의 제조 과정에서 역학적 성질을 개선하기 위하여 길이가 다른 2종의 섬유를 하이브리드(Hybrid)하여 혼입하였기 때문이다.

다만 본 연구는 정하중에 대한 보강 효과를 평가하는 것이 주목적이나, 본 연구 이후의 후속 연구에서는 충격하중에 대한 보강 효과를 평가하는 것이 목적이다. 이러한 이유로 CFS 및 NSHSDC를 콘크리트 인장부 뿐만 아니라 압축부에도 보강을 진행하여 하중 및 에너지 소산 능력을 평가하였다.

또한, 실험종류 후의 균열 양상 및 파괴 모드를 비교하여 보강기법에 따른 콘크리트의 구조적 특성에 대한 참고자료로 활용하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서 사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다. 배합 강도 45 MPa의 일반강도 콘크리트에 CFS 및 NSHSDC를 이용하여 압축부 및 인장부에 보강하였다.

CFS는 시공성이 우수하고 높은 강성을 가지므로, ACI 440.2R-02 (2002) 기준에 따라 CFS를 콘크리트의 압축부 및 인장부에 보강하였다. 한편, NSHSDC에 길이가 다른, 직선형 강섬유(Steel Fiber) 및 Polyethylene Fiber (PE) 섬유를 각각 1.0%, 0.5% 혼입한 부재를 제작하여 기존의 콘크리트의 압축부 및 인장부에 보강하였다(Yuan et al., 2020).

2.2 사용재료

실험에 사용된 재료는 다음과 같다. 우선 시멘트의 경우 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트(비표면적 3,492 cm²/g, 밀도 3.15 g/cm³)를 사용하였으며, 잔골재는 강사를 사용하였다. 또한, 굵은 골재는 최대치수 20 mm의 부순 돌을 사용하였다(Table 1). CFS는 국내 S사의 탄소 섬유 시트를 사용하였고, 원활한 부착을 위해 도포용 Epoxy를 사용하였다. CFS 및 Epoxy의 물리적 특성은 Table 2에 나타내었다. 한편, NSHSDC의 배합에는 Fig. 1과 같은 형상의 강섬유 및 PE 섬유를 사용하였으며, 상세한 재료 물성은 Table 3에 나타나있다. 고성능 감수제(Super-Plasticizer, SP)는 폴리카복산계(Polycarboxylate) 국내산 고성능 감수제(액상/갈색, 밀도 1.07g/cm³)로 1%를 혼입하여, 콘크리트의 배합이 원활히 진행되도록 하였고, Table 4는 사용된 철근의 물리적 특성을 나타낸다.

Table 2. Properties of CFS and Epoxy

	CFS	Epoxy
Tensile Strength (MPa)	4,900	90
Elastic Modulus (GPa)	230	3.0
Ultimate Strain (%)	2.1	8.0
Thickness (mm)	0.111	-

Table 1. Mixture Proportions of NC and NSHSDC (by weight)

	W/C (%)	Unit Weight (kg/m ³)						SP	SF	PF
		W	C	S	SS	G	F			
NC	43	0.43	1.00	2.15	-	2.43	-	1.0	-	-
NSHSDC	20	0.20	1.00	-	1.10	-	0.25	1.0	1.0	0.5

* W/C: water to cement ratio; W: water; C: cement; S: sand; SS: silica sand; G: gravel; F: silica fume; SP: super plasticizer; SF: steel fiber; PF: polyethylene fiber

Table 3. Properties of Steel Fiber and Polyethylene Fiber

	Diameter, d_f	Length, l_f (mm)	Aspect Ratio (l_f/d_f)	Density (g/cm^3)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
Steel Fiber	0.2 mm	19.5	97.5	7.80	2,650	200
Polyethylene Fiber	31 μm	12.0	580	0.97	2,900	100

Table 4. Properties of Reinforcement for Specimens

		Type	d_f (mm)	A_s (mm ²)	F_y (MPa)	E_s (GPa)	ϵ_y (mm/mm)
Longitudinal Reinforcement	D19	Deformed Bar	19.1	286.5	491	200	0.002455
Traverse Reinforcement	N8	Non-Deformed Rebar	8.0	50.3	466	200	0.002330

(a) Polyethylene Fiber

(b) Steel Fiber

Fig. 1. Polyethylene and Steel Fiber

2.3 시험체 제작

실험체는 제작된 콘크리트에 CFS와 NSHSDC를 인장 및 압축부에 보강하였다. Fig. 2는 U형 보강된 CFS의 단면을 나타내고 있으며, Fig. 3은 부재의 단면 및 배근 상세를 나타내고 있다. 실험 변수는 보강재의 종류, 보강 위치에 따라 Table 5에 정리되어 있다. 제작된 부재는 Fig. 4와 같이 총 7개로, 일반 콘크리트 1개, 전단 보강 콘크리트 1개, CFS 보강 콘크리트 3개, NSHSDC 보강 콘크리트 2개이다. NC 부재를 제외한 모든 부재는 폭 125 mm, 높이 250 mm, 길이 2,438 mm의 크기로, 인장철근(D19)과 압축 철근(N8)을 배근하였다. 또한, 휨 파괴 이전 전단파괴를 방지하기 위해 전단 철근(N8)을 ACI 318 (2019)의 최소 전단 철근 규정에 따라 101 mm 간격으로 배근하였다. 모든 실험체는 길이 2,222 mm의 단순 지지 보로 구성되며, 시험체의 세팅은 Fig. 5와 같다.

Fig. 2. U-Shape CFS Strengthening **Fig. 3.** Details of Reinforcement of RC Beams**Table 5.** Test Variables

Variable	Details	Notation
Normal Concrete	Normal Concrete without Shear Reinforcement	NC
	Normal Concrete with Shear Reinforcement	NCS
CFS	Top and Bottom Retrofitted with CFS	CFTB
	Bottom and Side Retrofitted with CFS	CFBS
	All Retrofitted with CFS	CFTBS
NSHSDC	Bottom Reinforced with NSHSDC	NSCB
	Top and Bottom Reinforced with NSHSDC	NSCTB

Fig. 4. Types of RC Beam Reinforcement

Fig. 5. Setup for Quasi-Static Test for Beams

2.3.1 CFS 시공방법

CFS의 시공방법은 Fig 6과 같다. 우선, 콘크리트와 CFS의 원활한 부착을 위해 콘크리트 표면을 그라인딩(Grinding)하여 평평하게 하였다. 그 후, 에폭시 프라이머 주재와 경화제를 2:1 비율로 넣고, 2~3분간 균일하게 섞은 뒤, 보강 부분에 고르게 바르고 10시간 이상 경화시켰다. 프라이머가 완전히 건조된 뒤, 함침용 수지 및 경화제를 2:1 비율로 섞어 콘크리트 단면에 균일하게 바른 후, CFS를 부재의 길이 방향으로 부착하였다(Ahn, 2002). 여기서 사용된 CFS는 일정 길이 이상 부착 시 보강 효과의 차이가 없다는 기존 연구 결과(Kadhim, 2012)를 참조하여 보강 길이를 하부 0.88 L, 상부 0.71 L로 지정하였다. 또한, CFBS 및 CFTBS 부재는 CFS를 상하부에 길이 방향으로 먼저 부착한 후, 전단 보강을 위해 2겹씩 U형 보강하였다.

Fig. 6. Working Process of CFS Attachment

2.3.2 NSHSDC 시공방법

본 실험에서는 제작된 콘크리트에 NSHSDC를 보강하였다. 우선, NSHSDC에 강섬유와 PE 섬유를 시멘트 중량 대비 각각 1.0%, 0.5%를 혼입하였다(Yuan, 2019). 여기서 NSHSDC는 굵은 골재를 혼입하지 않아 시멘트 페이스트의 균질성을 확보하였다. 이후 제작된 NSHSDC를 콘크리트 압축부 및 인장부에 타설한 후 1일간 경화를 진행하였다. 즉, 일반강도 콘크리트 (45 MPa급) 구조 부재에 NSHSDC를 하부(B, 40 mm) 및 상하부

(TB, 상부 20 mm, 하부 40 mm) 보강한 구조부재를 제작하였다 (Yuan et al., 2020).

2.4 실험방법

콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위해 압축강도는 ASTM C39 (2010) 기준에 따라, $\phi 100 \times 200$ mm 공시체에 3개의 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)를 설치하여 평균 압축 변형률을 측정하여, 탄성계수를 구하였다. 또한, 휨 인장강도는 ASTM C1609 (2012) 기준에 따라 재령 28일의 휨 인장강도를 측정하였으며, $100 \times 100 \times 400$ mm의 크기의 각주형 시편이다. 콘크리트의 압축강도 및 휨 인장강도 측정 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Mechanical Properties of Concrete

Concrete	Compressive Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
NC	53.4	7.8	33.2
NSHSDC	123.9	18.5	40.4

구조실험은 가력 용량 500 kN의 Universal Testing Machine (UTM)을 사용하여, 0.02 mm/s의 속도로 3점 가력하였다. 또한, 액추에이터(Actuator)에 로드 셀(Loadcell)을 설치하여, 하중을 측정하였고, 하중 재하에 따른 처짐을 평가하기 위해 보의 중앙부에 2개의 LVDT를 설치하여, 수직 처짐을 측정하였으며 인장철근 및 전단 철근에 변형률 게이지를 부착하여 하중 재하에 따른 변형률을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 하중 및 처짐

실험 결과는 Table 7과 같으며, P_{cr} 은 균열 발생 시 하중, P_y 는 항복 시 하중, P_u 는 최대하중을 의미하며 Δ_{cr} , Δ_y , Δ_p , Δ_u 는 각각 균열 발생 시 처짐, 항복 시 처짐, 최대하중일

때의 처짐 그리고 부재에 발생한 최대 처짐을 의미한다. 균열 하중의 경우 NC 및 NCS 부재에서 각각 11.81 kN, 12.88 kN이 발생하였다. 반면 CFS 및 NSHSDC로 보강한 부재는 보강량의 증가에 따라 균열 하중 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 CFS 및 NSHSDC의 보강량 증가로 부재의 초기 강성이 증진된 것으로 판단된다(Seo, 2009).

CFS로 보강한 부재는 최대하중 값이 약 97 kN~100 kN으로 모두 유사하게 나타났고, NCS 부재 대비 약 10% 정도 증가하였다. 최대하중 작용 시 부재에 발생하는 처짐은 CFTB, CFBS, CFTBS 부재에서 각각 24.95 mm, 19.65 mm, 18.03 mm로 처짐이 줄어드는 경향을 보였다. 이는 CFS의 보강면적 증가에 따라 최대하중까지 CFS의 강성이 증진된 것으로 판단된다(Seo et al., 2007). 하지만 최대하중 이후 급격히 하중이 줄어드는 경향을 확인할 수 있다(Fig. 7). 이는 인장부에 CFS의 보강 접수가 증가함에 따라 CFS와 콘크리트 사이에 발생하는 계면 응력이 집중되어, 최대하중 및 부재에 발생한 최대 처짐이 줄어드는 것으로 판단된다(Kim, 2012). 따라서 CFS로 부재를 보강할 경우, 초기균열 제어 및 초기 강성 증진에는 효과적이지만, CFS 보강량 증가 시 부재의 내력 저하 방지를 위한 추가적인 조치가 필요할 것으로 판단된다.

한편, NSHSDC로 보강된 부재 또한 NCS 부재 대비 최대하중 값이 약 8% 증가하였다(Fig. 7). 최대하중 작용 시 NSCB 및 NSCTB 부재는 각각 처짐이 16.39 mm, 14.61 mm로 NCS 부재 대비 약 CFS로 보강한 부재 대비 약 233%~237% 감소하였다. 하지만, 최대하중 이후 부재에 발생하는 최대 처짐은 CFS로 보강한 부재 대비 약 18~42% 정도 증가하였다. 이는 최대하중 이후 직선형 강성유역의 거시 균열 제어와 PE 섬유 미세 균열 제어로 인해 부재에 발생한 최대 처짐이 증가한 것으로 판단된다(Kim et al., 2009). 특히 NSCTB 부재는 최대하중 작용 시 처짐이 가장 적게 발생하였지만, 이후 처짐 증가율이 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 최대하중 이후 NSHSDC로 보강한 부재는 하중이 감소하면서 변형률 연화(Strain Softening)를 나타내었다.

Table 7. Test Results of Specimens

Test Member	First Cracking		Yielding State		Peak State		Ultimate State	Ductility Index		Failure Mode
	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_p (mm)	Δ_u (mm)	Δ_p/Δ_y	Δ_u/Δ_y	
NC	11.81	1.30	68.20	9.72	75.93	10.17	13.20	1.05	1.36	Shear Failure
NCS	12.88	1.43	83.10	11.12	91.58	55.08	72.10	4.95	6.48	Flexural Failure
CFTB	14.40	1.31	92.27	12.88	100.08	24.95	47.87	1.94	3.72	CFS Rupture
CFBS	14.83	1.62	90.26	13.18	97.67	19.65	40.60	1.49	3.08	CFS Delamination
CFTBS	14.88	1.85	91.72	13.86	98.16	18.03	41.84	1.30	3.02	CFS Delamination
NSCB	13.83	1.24	94.96	12.55	98.43	16.39	57.74	1.31	4.60	Flexural Failure
NSCTB	18.14	2.10	91.25	11.99	99.38	14.61	56.63	1.22	4.72	Flexural Failure

(a) CFS Series of Load-Deflection Curves

(b) NSHSDC Series of Load-Deflection Curves

(c) CFS & NSHSDC of Load-Deflection Curves

Fig. 7. Load-Deflection Curves

3.2 보강 방법에 따른 영향

CFS 보강 부재는 보강 방법에 따라 CFTB, CFBS, CFTBS로 분류하였다. CFTB 및 CFTBS 부재는 최대하중 이후, CFS의 파단 및 콘크리트의 압축파괴가 일어난 것을 확인할 수 있다. CFBS 부재는 CFTB 부재 대비 콘크리트의 압축파괴는 적게 발생하였지만, 인장부의 CFS 보강 겹수의 증가에 따른 조기 탈락이 발생하였다. 즉, CFS의 부착파괴 및 부재 내부 휨 균열이 발생하여 CFS와 콘크리트의 박리(Delamination)가 나타났다는 것이다.

한편, NSHSDC 부재도 보강 방법에 따라 NSCB 및

NSCTB 부재로 분류되는데, NSCB 부재는 인장부에 다수의 휨 균열이 진행된 후, 압축부의 콘크리트 파괴가 일어났다. 이는 직선형 강섬유가 가교역할을 하여, 최초 균열 발생 이후 인장부에 다수의 균열이 추가로 생성되었기 때문이다 (Yoo and Yoon, 2015). 반면 NSCTB 부재는 압축부 NSHSDC 보강면의 영향으로 NSCB 부재 대비 콘크리트 압축파괴가 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

3.3 연성 및 에너지 소산 능력 비교

연성지수는 최대하중 이후 부재의 하중 저항능력을 평가하는 데 사용되며, 다음의 식으로 부재의 연성을 평가하였다.

$$Ductility\ Index = \frac{\phi_p}{\phi_y} \quad (1)$$

$$Ductility\ Index = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2)$$

여기서 ϕ_p 는 각각 최대하중 작용 시 구조 부재에 발생하는 처짐을, ϕ_u 는 최대하중 이후에 구조 부재에 발생하는 최대 처짐을 의미하며, ϕ_y 는 항복 하중 시 발생하는 구조 부재의 처짐을 나타낸 것이다. 콘크리트 부재는 최대하중을 넘어서 부재의 변형이 계속 발생한 후 실험체가 파괴된다는 점에서 본 연구에서는 실험체의 연성 평가를 위한 방법으로 Eq. (2)의 방법을 통해 구조부재의 연성지수를 평가하였다. 에너지 소산 능력은 구조물에 발생한 최대 처짐 지점에서 수직으로 내린 구간까지의 넓이를 구하였다 (Alsayed and Alhozaimy, 1999). CFTB, CFBS, CFTBS 부재의 연성지수는 각각 3.72, 3.08, 3.02이고, 에너지 소산 능력은 각각 4.10, 3.12, 3.11이다 (Tables 7, 8). CFS로 보강한 부재는 보강면적이 넓어짐에 따라 연성지수 및 에너지 소산 능력이 감소하는 경향을 보인다. 특히 CFTB 부재 대비 CFTBS 부재는 연성지수 및 에너지 소산 능력이 약 18%, 31%가 감소한 것을 알 수 있다. 이는 U형 보강함에 따라, 콘크리트의 처짐을 제어하기는 하나, 보강재의 강성이 커짐에 따라 CFS의 최대 저항성능이 발휘되기 전에 콘크리트에 작용하는 응력이 콘크리트의 인장 한계를 넘은 것으로 판단된다 (Kim, 2012).

반면 NSCB 및 NSCTB 부재의 연성지수는 각각 4.60, 4.72이고 에너지 소산 능력은 각각 4.40, 4.48이다 (Tables 7, 8). 최대하중 이후 NSHSDC로 보강한 부재는 CFS로 보강한 부재보다 연성지수 및 에너지 소산 능력이 더 높은 것을 알 수 있다 (Kim et al., 2009). 또한, 보강면적이 넓어짐에 따라 NSHSDC로 보강한 부재의 연성지수 및 에너지 소산 능력은 다소 증가한 것을 알 수 있다. 압축부 보강을 한 NSCTB 부재에서의 연성지수 및 에너지 소산능력은 압축부 보강을 하지 않은 NSCB 부재 대비 더 높게 나타났다. 따라서

구조물의 연성 및 에너지 소산 능력을 높이기 위해서는 NSHSDC를 콘크리트 압축부 및 인장부에 모두 보강하는 것이 가장 효율적이라 판단된다.

Table 8. Test Results of Dissipated Energy

Series	Maximum Load (kN)	Deflection at Max. Load (mm)	Dissipated Energy (kJ)
NC	75.93	10.17	0.39
NCS	91.58	55.08	5.73
CFTB	100.08	24.95	4.10
CFBS	97.67	19.65	3.12
CFTBS	98.16	18.03	3.11
NSCB	98.43	16.39	4.40
NSCTB	99.38	14.61	4.48

Cho and Kim (2008)에 따르면 콘크리트 보의 연성지수는 3.0 이상을 만족할 때 사용성 측면에서 안전하다고 제시하고 있다. 실험결과 CFS 및 NSHSDC로 보강한 콘크리트 부재는 NSC 부재 대비 다소 취성적인 특성을 보이나, 보강보의 연성 지수가 모두 3.0 이상을 만족하므로, 부재의 사용성 측면에서 안전하다고 판단된다.

3.4 파괴 모드 및 균열

CFS로 보강한 보의 파괴 모드는 콘크리트, 철근, CFS 및 에폭시 등에 의해 영향을 받는다(Kim, 2012). Teng et al. (2002)는 CFS로 보강된 콘크리트의 파괴 모드로 Fig. 8과 같이 휨 파괴, 콘크리트 압축파괴, 전단파괴, 시트의 부착파괴, 콘크리트 피복탈락 등을 제시하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 NC 부재는 전단파괴, NCS 부재는 휨 파괴가 발생하였다. CFTB 부재는 CFS와 콘크리트가 함께 탈락하는 계면 부착파괴가 발생하였다. 전반적으로 CFS를 부착한 부재는 최대하중 이후 급격한 내력 저하로 인해, 균열발생량이 NSHSDC로 보강한 부재보다 더 적은 것을 확인할 수 있다. 특히, CFBS 및 CFTBS 부재는 CFS의 부착으로 균열을 거의 확인할 수 없었다. 즉, 최대하중 이후 콘크리트 내부에 휨 균열이 발생하여 따라 추가적인 균열이 발생하지 않고 급격히 하중이 줄어들었다는 것이다. 따라서 반면, NSHSDC로 보강된 부재는 CFS로 보강한 부재 대비 균열 개수가 증가하고 발생 균열 폭이 더 좁은 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 9에서 알 수 있듯이 NSCB 부재는 하중 재하면의 콘크리트 압축파괴가 발생한 것을 확인할 수 있다. 반면 NSCTB 부재는 압축 보강면의 영향으로, NSCB 부재 대비 콘크리트 압축파괴가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8. Failure Mode of RC Beam Strengthened by CFS (Teng et al., 2002)

Fig. 9. Crack Profiles of Beams under Quasi-Static Test

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 하중 저항능력을 높이고, 조기 압축파괴를 방지하고자 CFS 및 NSHSDC로 콘크리트를 보강한 후, 하중에 따른 처짐 및 에너지 소산 능력을 평가하였다. 또한, 보강 방법에 따른 파괴 모드를 비교하여, 구조부재의 성능을 평가하였다. 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다양한 보강 방법에도 불구하고, 콘크리트 부재의 최대하중은 모두 유사하게 나타났다. 또한, 보강면이 늘어남에 따라 최대하중 작용 시 처짐이 줄어드는 경향이 나타났다. 하지만 CFS로 보강한 부재는 CFS의 보강 접수가 증가함에 따라, 최대하중 이후 CFS의 조기 박락이 발생하여 급격히 하중 저항능력이 줄어들었다.
- (2) 보강 방법에 따른 영향을 비교한 경우, 압축부 및 인장부를 CFS 및 NSHSDC로 보강한 부재에서 콘크리트 압축파괴가 현저히 줄어든 것으로 확인되었다.
- (3) 연성지수 및 에너지 소산 능력은 NSHSDC로 보강한 부재가 CFS로 보강한 부재보다 더 큰 값을 나타냈다. 이는 NSHSDC로 보강한 부재가 최대하중 이후 강섬유 및 PE 섬유가 가교역할로 인해 높은 연성 거동을 보이기 때문이다.
- (4) CFS 및 NSHSDC로 보강한 부재의 파괴 모드 및 균열 발생을 비교할 때, NSHSDC로 보강한 부재에서 균열 개수가 증가하고, 균열 발생 면적이 더 넓은 것을 확인할 수 있다. 이는 CFS로 보강한 부재에서 최대하중 증가 이후 급격히 실험이 종료되었기 때문이다.

이상을 종합하여 볼 때, NSHSDC를 콘크리트 압축부 및 인장부에 모두 보강할 경우, 우수한 하중 저항능력 및 처짐 제어를 기대할 수 있으며, 콘크리트의 조기 압축파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비(과제번호: 19CTAP-C151911-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

ACI 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American Concrete Institute, pp. 351-354.

ACI 440.2R-02. (2002). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute, pp. 1-8.

Ahn, S.H. (2002). A study on bond strength between fiber sheet and concrete for concrete surface preparation and heating condition. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 6, No. 4, pp. 201-207.

Alsayed, S.H., and Alhozaimy, A.M. (1999). Ductility of concrete beams reinforced with FRP bars and steel fibers. *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 19, pp. 1792-1806.

ASTM C1609. (2012). *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*. ASTM International.

ASTM C39. (2010). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.

Attari, N., Amziane, S., and Chemrouk, M. (2012). Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 746-757.

Back, J.M., and Jang, S.J. (2006). A basic study on the standardization of epoxy injection on concrete structure crack. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 10, No. 1, pp. 115-122.

Cho, B.S., and Kim, S.D. (2008). Flexural behaviors of reinforced concrete beams strengthened with fiber-steel composite plates. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 21, No. 5, pp. 483-491.

Cho, S.H., Min, K.H., Kim, Y.J., and Yoon, Y.S. (2010). Impact resistance evaluation of RC beams strengthened with carbon FRP sheet and steel fiber. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 5, pp. 719-725.

Hwang, E.S., and Lee, S.W. (2007). A study on the effect of rehabilitation methods in aged concrete pavement using the LTPP data. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3D, pp. 325-332.

Kadhim, M.M.A. (2012). Effect of CFRP sheet length on the behavior of HSC continuous beam. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 27, No. 1, pp. 33-44.

Kim, H.S. (2012). Experimental studies of effect of beam

- sizes and CFRP layers on structural behaviors of reinforced concrete beams strengthened with CFRPs (Carbon Fiber Reinforced Polymers). *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 28, No. 11, pp. 99-106.
- Kim, M.H., Min, K.H., Yoo, D.Y., and Yoon, Y.S. (2011). Strengthening effect of CFRP sheets and steel fibers for enhancing the impact resistance of RC beams. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol 11, No. 5, pp. 41-47.
- Kim, S.W., Cho, H.M., Lee, H.Y., and Park, C.W. (2015). Flexural performance characteristics of high performance slurry infiltrated fiber reinforced cementitious composite according to fiber volume fraction. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 19, No. 4, pp. 109-115.
- Kim, Y.W., Min, K.H., Yang, J.M., and Yoon, Y.S. (2009). Flexural and impact resisting performance of HPFRCCs using hybrid PVA fibers. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 6, pp. 705-712.
- Ko, H.B. (2006). Bond characteristics between fiber reinforced polymer (FRP) sheet and concrete. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 22, No. 8, pp. 69-76.
- Naaman, A.E., and Reinhardt, H.W. (2003). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPFRCC4: International RILEM workshop. *Materials and Structures*, Vol. 36, pp. 710-712.
- Park, J.Y., Cho, H.D., Han, S.H. (2002). Improvement of flexural capacity according to strengthening method of RC beam with CFRP plate. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 895-903.
- Seo, S.T. (2009). Analytical study of behavior on structure reinforced fiber sheet. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, Vol. 12, No. 2, pp. 107-112.
- Seo, S.Y., Yun, H.D., and Choi, K.B. (2007). Structural capacity of RC beam retrofitted by CFS with bond loss. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 6, pp. 795-802.
- Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., and Lam, L. (2002). *FRP: Strengthened RC structures*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Yoo, D.Y., and Yoon, Y.S. (2015). Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, Vol. 102, pp. 409-423.
- Yuan, T.F. (2019). *Development of no-slump high-strength, high-ductility concrete for repairs and strengthening*. Ph.D. dissertation, Korea University.
- Yuan, T.F., Lee, J.Y., and Yoon, Y.S. (2020). Enhancing the tensile capacity of no-slump high-strength high-ductility concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 106, 103458. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.103458
- Yuan, T.F., Lee, J.Y., Min, K.H., and Yoon, Y.S. (2019). Experimental investigation on mechanical properties of hybrid steel and polyethylene fiber-reinforced no-slump high-strength concrete. *International Journal of Polymer Science*, Vol. 2019, Article ID 4737384. doi:10.1155/2019/4737384

Received	July 8, 2020
Revised	July 9, 2020
Accepted	July 24, 2020