

## Mechanical properties of carbon fiber sheet and carbon fiber strand sheet based on carbon fibers for the reinforcement of highway bridge RC slabs

Chan Ho Won, Tadashi Abe\* and Tae-Ho Ahn\*\*,\*†

*The Research Institute of Industrial Science, Hanyang University, Seoul 04763, Korea*

*\*Dept. of Civil Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Chiba 275-8575, Japan*

*\*\*International Sustainable Engineering Materials (ISEM) Center, Ceramic Materials Institute & Division of Advanced Materials Sci. Eng., Hanyang University, Seoul 04763, Korea*

(Received November 16, 2015)

(Revised November 19, 2015)

(Accepted November 27, 2015)

**Abstract** Recently, a lot of interest has been shown in structural maintenance managements of civil infrastructures. Many researchers have been conducted on various maintenance techniques and repair materials. Among other fiber materials the carbon fiber materials are especially focused on maintenance management of Highway Bridges. Extensive work has been done on Carbon Fiber Sheet (CFS). Nevertheless, Carbon Fiber Strand Sheet (CFSS) is a newly developed material, on which limited work has been done until now. Therefore, in this study bonding the CFSS to RC slab specimen and fatigue resistance evaluation has been conducted. The results demonstrated an increase of 25.3 times more reinforcement of RC slab compared to non-reinforced RC slab. Moreover, compared to CFS-bonded RC slab, The CFSS-bonded RC slab showed 1.2 times greater reinforcement.

**Key words** RC slab, Maintenance, Repair materials, Carbon fiber sheet (CFS), Carbon fiber strand sheet (CFSS)

## 도로교 RC 상판 보강을 위한 탄소섬유 기초 carbon fiber sheet와 carbon fiber strand sheet의 역학특성

원찬호, Tadashi Abe\*, 안태호\*\*,\*†

한양대학교 부설산업과학연구소, 서울, 04763

\*니혼대학교 토목공학과, 치바, 275-8575

\*한양대학교 신소재공학과, 세라믹연구소 국제지속가능공학소재(ISEM)센터, 서울, 04763

(2015년 11월 16일 접수)

(2015년 11월 19일 심사완료)

(2015년 11월 27일 게재확정)

**요약** 최근 사회기반시설물의 구조물 유지관리 분야의 관심이 높아짐에 따라 새로운 유지관리 공법 및 신소재에 관한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 그중에서도 유지관리의 주요 대상인 교량 유지관리에는 탄소섬유를 이용한 공법이 주목을 받고 있다. 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet, 이하 CFS)는 이미 여러 연구자들이 국내에서도 재료시험 및 보강공법에 관한 연구를 진행하여 연구결과가 보고되고 있지만, 탄소섬유 스트랜드 시트(Carbon Fiber Strand Sheet, 이하 CFSS)는 최근 새롭게 개발된 재료로써 아직까지 국내에는 연구 성과가 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 CFSS를 RC 상판 공시체에 접착보강하여 내피로성을 평가하였다. 그 결과, 무보강 RC 상판 공시체에 비해 약 25.3배의 보강 효과가 확인되었고, CFS 접착보강 RC 상판 공시체에 비교하여 약 1.2배의 보강 효과가 확인되었다.

†Corresponding author

Tel: +82-2-891-5380

Fax: +82-2-891-5381

E-mail: thahn@hanyang.ac.kr

## 1. 서 론

최근 선진국에서는 사회기반시설물의 고령화에 따른 유지관리분야의 관심이 높아짐에 따라 도로교 RC 상판의 보강대책에 관해서도 국내외에서 여러 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다[1-5]. 도로교 RC 상판의 보강방법은 크게 상판의 상면 보강방법과 상판의 하면 보강방법으로 분류할 수 있다. 상판의 상면에 보강방법이 요구되는 경우에는 SFRC(Steel Fiber Reinforced Concrete)를 이용한 상면증압 또는 부분타설 공법이 적용되고 있다[6, 7]. SFRC 상면증압공법은 교통 통제 또는 통행정지가 필요하다는 단점이 있지만 유효단면의 증가로 인해 RC 상판의 편칭전단내하력 및 휨내하력을 높게 향상시킬 수 있는 공법이기도 하다. 또한 경년열화, 교통량의 증대, 차량 대형화에 의한 상판 하면에 균열이 발생하여 상판 하면으로부터 보강대책이 필요한 경우에는 균열을 구속하여 진행을 억제 시키는 CFS를 이용한 접착보강공법이 적용되고 있는 실정이다[8].

도로교 RC 상판의 보강에 사용되는 CFS는 연속섬유시트의 한 종류로, 연속섬유시트에는 탄소섬유를 원료로 한 탄소섬유재료, 아라미드 섬유를 원료로 한 아라미드 섬유재료, 유리섬유를 원료로 한 유리섬유재료가 있다. 또한, 최근에는 탄소섬유재료 중 가장 일반적으로 사용되는 CFS와는 별도로 탄소섬유를 스트랜드(Strand) 형태로 가공한 CFSS가 개발되어 사용되어지고 있기도 하다. CFS를 포함한 탄소섬유재료 및 아라미드섬유재료에 관한 연구는 이미 여러 연구결과가 있지만, CFSS의 경우는 최근 새롭게 개발된 소재로써 아직까지 많은 연구결과가 보고되어 있지는 않다. 따라서, 본 연구에서는 최근 국내외에서 도로교 RC 상판의 보강에 적용이 검토되고 있는 CFS 및 CFSS를 3/5 모델로 제작한 RC 상판 실험체에 각각 전면접착보강 및 격자접착보강을 실시하여 운하중주행 피로실험을 통해 내피로성을 비교 평가하여 그 성능을 검토하였다.

## 2. 운하중주행 피로실험 개요 및 사용재료

### 2.1. 운하중주행 피로실험

운하중주행 피로실험을 위해 본 실험에서 사용한 실험



Fig. 1. Fatigue test under running wheel load equipment.

체는 일본 도로교 시방서[9]의 규정에 기초하여 설계하고, 본 실험 장치의 운하중 즉, 차륜 폭과 도로교 시방서가 규정하는 운하중 폭(500 mm)의 비율에 의해 모델화 한 것을 사용하였다. 따라서, 본 실험 장치에 대한 운하중 폭이 300 mm의 차륜으로 실험하는 실험체를 3/5 모델(= 300/500)로 하였다. 본 실험에 사용한 운하중주행피로 실험 장치는 Fig. 1에 나타내었다.

운하중 주행 피로 실험을 진행하기 위해서는 강제 반력 프레임(400 kN)의 빔에 강제의 운하중을 설치한 후, 유압식의 진동 피로 실험기를 고정 시킨다. 그리고 실험체를 설치한 대차를 모터와 크랭크 암의 연결에 의한 수평 방향으로 왕복 운동 시킴으로써 운하중의 주행 상태를 재현할 수 있도록 한다. 운하중 주행을 통한 피로실험에 의한 CFS 및 CFSS 접착 보강 RC 상판의 보강 효과 및 내피로성의 평가는 주행 20,000회 마다 하중을 단계적으로 증가시키므로 기준 하중에 대한 실험 하중과 실험 주행 횟수로부터 등가주행횟수를 산출하여 평가한다.

### 2.2. RC 상판 공시체 개요

RC 상판 실험체의 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하고, 5 mm 이하의 잔골재, 그리고 5 mm~20 mm의 굵은골재(JIS A 5005)를 사용하였다. 도로교 시방서에서는 도로교 RC 상판에 사용하는 콘크리트의 설계 기준 강도를 24 N/mm<sup>2</sup> 이상으로 지정하고 있어, RC 상판 실험체 콘크리트는 설계 기준 강도를 24 N/mm<sup>2</sup> 이상(실험

Table 1  
Mix proportions of concrete for RC slab

Slump (cm)	W/C (%)	s/a	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Chemical admixture (ml)	
			C	W	S	G	SP	AE	
18 ± 2.5	51.4	51.2	319	164	953	886	1.91	16	

Table 2  
Characteristic values of concrete and rebars

Test specimen	Compressive strength of concrete (N/mm <sup>2</sup> )	Rebar (SD 295 A)			
		Diameter of rebar	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kN/mm <sup>2</sup> )
RC slab	30	D13	370	511	200

시 압축 강도 30 N/mm<sup>2</sup>)을 목표로 하여 배합하였다. 철근에는 실험체 모두 SD295 A, D13을 사용하였다. RC 상판 실험체에 대한 콘크리트 배합은 Table 1에 윤하중 주행 피로 실험에 대한 실험시의 콘크리트 압축 강도 및 철근의 재료 특성은 Table 2에 나타내었다.

### 2.3. CFS 및 CFSS의 재료특성

본 실험에 사용된 CFS는 단위중량 200 g/m<sup>2</sup>, 설계 두께 0.111 mm의 연속 섬유 시트로 RC 상판과 CFS의 접착 강도를 높이기 위한 CFS 전용의 프라이머 접착제를 사용하였다. 또한, 새로운 소재인 CFSS는 수지를 함침, 경화시킨 탄소섬유보강 플라스틱(CFRP) 스트랜드 형태로 가공한 재료이다. 본 연구에서 보강방법은 CFS 전면접착보강한 CFS의 단위중량과 CFSS 격자접착보강의 단위중량을 동일하게 설정하였다. 따라서, 실험에 사용된 CFSS는 단위중량 600 g/m<sup>2</sup>, 설계 두께 0.333 mm의 것을 사용하였다. CFS 및 CFSS의 재료 특성은 Table 3에 정리하였다.

### 2.4. CFS 및 CFSS 접착보강 방법

CFS의 전면접착보강 방법은 먼저, RC 상판 하면의 불순물의 제거 및 표면 처리를 한다. 표면 처리 후, CFS의 접착력을 높이기 위한 프라이머의 도포 및 양생을 하고, CFS 전용 에폭시 계열 함침 수지를 이용하여 전면접착 시킨 후 12시간 이상 양생을 한다. 같은 방법으로 2번째 층을 접착한다. 여기서, RC 상판 실험체에 각각 CFS 접착보강한 실험체의 명칭을 CFS-1,2로 한다.

CFSS의 접착 설계량은 기본적으로 CFS를 2방향으로 전면으로 접착한 양과 같은 양을 배치하였다. CFSS 격자접착보강 방법은 먼저, RC 상판의 하면의 불순물을 제거한다. 그리고 RC 상판 하면의 CFSS 격자접착 보강

의 격자간 사이를 마스킹 테이프를 이용하여 마스킹 한 후, 마스킹 한 이외의 면에 CFSS를 축 직각 방향으로 배치하고, CFSS의 발 사이의 공간으로 에폭시계열 수지 접착제를 침투 시키며 접착한다. 축 직각 방향의 1층 부를 접착 시킨 후, 이어 축 방향의 2층 부를 같은 방법으로 접착시켜 격자 형태를 만든다. 마지막으로 마스킹 테이프를 제거한다. CFS에 의한 접착보강법은 표면 처리 후, 프라이머의 함침처리와 양생을 필요로 하지만, CFSS의 경우는 콘크리트의 표면 처리 후, 직접 CFSS를 접착하기 때문에 시공의 간소화 및 공사기간의 단축이 가능해지는 장점이 있다. 여기서, CFSS 접착 보강한 실험체의 명칭을 각각 CFSS-1,2로 한다.

## 3. 등가주행횟수 및 실험 결과

### 3.1. 등가주행횟수

윤하중 주행 피로 실험은 주행 20,000회 마다 하중을 증가 시키기 때문에 기준 하중과 재하 하중 그리고 실험 주행횟수의 관계로부터 등가주행횟수( $N_{eq}$ )를 산출, 보강 효과 및 내피로성을 평가하였다. 윤하중 주행에 의한 등가주행횟수  $N_{eq}$ 는 마이너 측에 따른다고 가정하고 다음 식(식-1)으로 나타낼 수 있다. 또한, 식-1에 적용하는 S-N 곡선의 기울기의 역수  $m$ 에는 마쓰이가 제안[10]하는 12.7을 적용하였다.

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $N_{eq}$ : 등가주행횟수(회),  $P_i$ : 재하 하중(kN),  $P$ : 기준 하중(72 kN),  $n_i$ : 실험 주행 횟수(회),  $m$ : S-N 곡선의 기울기의 역수(12.7)

### 3.2. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 무보강 RC 상판 [3] 및 CFS 하면 접착 보강 RC 상판의 등가주행횟수 결과는 Table 4에 나타내었다.

무보강 RC 상판 공시체의 평균등가주행횟수  $N_{eq}$ 는  $12.81 \times 10^6$ 회 이었으며, CFS 접착보강 RC 상판 공시체

Table 3  
Mechanical properties of CFS and CFSS

Sheet name	Unit weight (g/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kN/mm <sup>2</sup> )
CFS	200	0.111	4,420	235
CFSS	600	0.333	3,400	245

Table 4  
Number of equivalent cycles and Reinforcement number of equivalent cycles

Test specimen	Load					Total number of equivalent cycles	Average number of equivalent cycles	Number of equivalent cycles ratio
	100 kN	120 kN	140 kN	150 kN	160 kN			
RC-1	1,296,903	9,941,720				11,238,624	12,814,782	-
RC-2	1,296,903	13,094,037				14,390,941		
CFS-1	1,296,903	13,137,391	93,053,635	150,635,099		258,123,028	263,822,131	20.6
CFS-2	1,296,903	13,137,391	93,053,635	162,033,304		269,521,233		
CFSS-1	1,296,903	13,137,391	93,053,635	162,033,304		302,173,738		
CFSS-2	1,296,903	13,137,391	93,053,635	223,494,212	15,065,638	346,047,779	324,110,759	25.3

의 평균등가주행횟수는  $263.82 \times 10^6$ 회로 RC 상판 공시체에 비하여 내피로성이 약 20.6배가 큰 것을 알 수 있었다. 또한 CFSS 격자접착보강 RC 상판 공시체의 평균등가주행횟수는  $324.11 \times 10^6$ 회로 조사되어 무보강 RC 상판 공시체보다 CFSS 격자접착보강 방법이 내피로성 측면에서 약 25.3배 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 CFS 접착보강 RC 상판 공시체와 CFSS 격자접착보강 RC 상판 공시체의 평균등가주행횟수를 비교하여 본 결과 CFSS 격자접착보강의 공시체가 약 1.2배의 더 큰 보강효과가 있는 것을 알 수 있었다. 따라서 CFS 접착보강 RC 상판 실험체와 마찬가지로 신재료, 신공법의 CFSS 격자접착보강법의 등가주행횟수가 CFS 접착보강법의 등가주행횟수를 상회하는 결과가 나타났다.

#### 4. 결 론

1) CFSS는 공장에서 수지를 함침, 경화 시켜 CFRP화 시켰기 때문에 시공 현장에서 시공성이 우수하며, 시공 불량현상이 저감되는 것을 알 수 있었다. 또한 섬유 단위중량은 2~3배, 설계두께는 2~3배로 제조하는 것도 가능하기 때문에 전면으로 접착해야 하는 CFS와 비교하여 같은량의 단위중량을 격자형으로 접착시키는 것이 가능하다는 특징을 보유하고 있는 것을 알 수 있었다.

2) CFS 접착보강한 RC 상판 공시체의 등가주행횟수는 무 보강 RC 상판 공시체에 비해 20.6배의 보강효과가 확인되었다. 또한 신재료, 신공법의 CFSS를 격자형으로 접착보강한 RC 상판 공시체는 무보강 RC 상판 공시체에 비해 약 25.3배의 보강효과가 확인되었다. 또한, CFS 접착보강 RC 상판 공시체에 비교하여 약 1.2배의 보강효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구 논문과 관련된 (주)세릭(SERIC Co. Ltd.) R&D 센터의 연구관계자 여러분께 감사드립니다. (www.seric.co.kr)

#### References

- [ 1 ] M. Takano, T. Abe, T. Kida, A. Komori, T.Kodama and Y. Ogawa, "Fatigue resistance by the CFSS bottom reinforcement and SFRC upper overlaid of RC slabs used for 47 years", J. Struc. Eng. 57A (2010) 1286.
- [ 2 ] C.H. Won, T. Abe, T. Kida, M. Takano and A. Komori, "The effect of reinforcement and fatigue resistance of the CFS- and CFSS-reinforced RC slabs", J. Struc. Eng. 58A (2012) 1189.
- [ 3 ] C.H. Won, T. Abe, T. Kida and A. Komori, "Evaluation of the fatigue resistance of RC slabs strengthened by bonding CFS, CFSS lattices, and proposal of an S-N curve equation", Cem. Sci. & Conc. Tech. 66 (2013) 576.
- [ 4 ] T. Abe, K. Minakuchi, C.H. Won and Y. Kawai, "Evaluation of fatigue resistance of RC slabs with fatigue damage given primary and secondary strengthen", J. Struc. Eng. 59A (2013) 1101.
- [ 5 ] W.C. Oh, B.S. Kim, C.S. Lim and W.C. Jang, "Preparation and properties of antibacterial activated carbon fiber", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 12 (2002) 165.
- [ 6 ] T. Abe, H. Suzuki, Y. Kishi and K. Nomoto, "The effect of adhesive on the fatigue resistance of RC slabs strengthened by SFRC upper surface thickness increasing method", J. Struc. Eng. 59A (2013) 1084.
- [ 7 ] K. Ito, T. Abe, M. Sugano and T. Kodama, "Evaluation of fatigue resistance of highway bridge RC slabs that have been strengthened by partial replacement", J. Struc. Eng. 59A (2013) 1092.
- [ 8 ] Public Works Research Institute, "Joint research report on the repair, reinforcement of concrete member, - The design and construction guidelines (plan) for the repair and reinforcement of highway bridge concrete parts using adhesive-bottom side carbon fiber sheets (CFS) -", Public Works Research Institute, (Public Works Research Institute, Miyagi, 1999).
- [ 9 ] Japan Road Association, "Specifications for highway bridges · commentary", Japan Road Association, Part I. Common, Part II. Steel bridge (Maruzen, Tokyo, 2002).
- [ 10 ] M. Shigeyuki, "Highway bridge slab design-construction and maintenance", M. Shigeyuki (Morikita, Tokyo, 2007).