

Relationship between fatigue resistance and fracture behavior of the carbon fiber sheet and carbon fiber strand sheet reinforced RC slabs

Chan Ho Won, Tadashi Abe*, Tae-Ho Ahn**,† and Do Keun Kim***

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*

****Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea*

(Received November 19, 2015)

(Revised November 20, 2015)

(Accepted November 27, 2015)

Abstract According to the results of “Highway Bridges Long Life Repair Plan.” The most serious damage to RC slabs is caused by fatigue deterioration, which results from the driving loads of large-sized vehicles, and aging of materials. In response to this, adhesion reinforcement using carbon fiber sheet is being adopted. In addition, carbon fiber strand sheet that holds the same material characteristics as CFS, but has superior workability, has been developed as a new reinforcement material. However, almost no studies have been conducted on CFSS in relation to fatigue resistance evaluation through fatigue tests under running wheel loads, with the exception of a few by some organizations. Therefore, in this study, specimens with front CFS adhesion reinforcement on the bottom surface of the RC slab and specimens with grid-type CFSS reinforcement were manufactured. Then, fatigue tests under running wheel loads were conducted, and thus fatigue resistance was evaluated using the specimens.

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

Carbon fiber sheet 및 carbon fiber strand sheet 접착보강한 RC 상판의 내피로성과 파괴거동과의 상관관계

원찬호, Tadashi Abe*, 안태호**,†, 김도근***

한양대학교 부설산업과학연구소, 서울, 04763

*니혼대학교 토목공학과, 치바, 275-8575

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

***한양대학교 건설환경공학과, 서울, 04763

(2015년 11월 19일 접수)

(2015년 11월 20일 심사완료)

(2015년 11월 27일 게재확정)

요약 일본 국토교통성이 책정한 <도로교 장수명화 수선계획사업>에 의하면, 주요 지역에 건설된 RC 상판의 심각한 손상 원인은 대형차량의 주행하중에 의한 피로열화와 재료의 경년열화 등으로 보고되어지고 있다. 따라서 이에 대한 대책으로 탄소섬유 시트를 이용한 하부 접착 보강공법이 많이 소개되어지고 있으나, 최근에는 CFS와 동등한 재료특성치를 보유하며, 시공성이 뛰어난 탄소섬유 스트랜드 시트가 새로운 보강재료로써 관심이 증폭되어지고 있다. 그러나 이러한 CFSS의 유효성 피로실험을 통한 내피로성 평가는 현재 일부 연구기관에서만 그 성과가 보고되어지고 있는 실정이며, 국내에서는 아직까지 연구성과에 관한 보고 등이 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 RC 상판의 하부에 CFS를 전면접착 보강한 실험체와 CFSS를 격자형으로 보강한 실험체를 제작하여, 유효성 피로실험을 실시하고 내피로성을 평가하였다.

†Corresponding author

Tel: +82-2-891-5380

Fax: +82-2-891-5381

E-mail: thahn@hanyang.ac.kr

1. 서 론

도로교 RC 상판은 대형차량의 반복주행 작용에 의한 피로열화 및 콘크리트 재료의 경년열화로 인해 균열이 발생하며, 이로인하여 내하력성능 및 내피로성의 저하가 급격히 증가되고 있는 추세이다[1, 2]. 이에 대한 대책으로, 도로교 RC 상판 균열의 손상에 따른 내하력성능 및 내피로성의 회복은 경량 및 시공성이 우수한 탄소섬유 시트(이하, CFS) 접착보강공법이 많이 검토되어지고 있다[3-5]. 최근에는 이러한 CFS 접착보강공법을 보완한 시공성이 더욱 개선된 탄소섬유 스트랜드 시트(이하, CFSS)가 새로운 보강재료로써 개발되어, 일부 연구가 진행되어지고 있다[6-8]. CFS는 국내외에서 내하력 성능 및 내피로성 증진목적으로 사용되는 탄소섬유 재료의 일종으로써 실제 교량에 적용된 사례도 많이 보고되어지고 있다[3, 9]. 그러나, 최근 많은 관심이 증폭되어지고 있는 CFSS의 경우에는 아직까지 내하력성능 및 내피로성에 관한 연구가 미흡한 실정이다[3].

따라서, 본 연구에서는 RC 상판의 하부 전면에 CFS를 접착보강한 공시체 및 같은 양의 CFSS를 상판 하부에 격자형으로 접착한 공시체를 이용하여 운하중 피로실험을 통해 내피로성을 평가하였다.

2. 탄소섬유보강 RC 상판의 피로실험

2.1. 실험체 개요

본 실험에서 사용한 실험체는 일본 도로교 시방서[10]의 규정에 기초하여 설계하고, 본 실험장치의 운하중 즉, 차륜 폭과 도로교 시방서가 규정하는 운하중 폭(500 mm)의 비율에 의해 모델화 한 것을 사용하였다. 즉, 본 실험장치에 대한 운하중 폭이 300 mm의 차륜으로 실험하는 실험체를 3/5 모델(= 300/500)로 한다.

2.2. RC 상판

실험대상의 RC 상판 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하고, 5 mm 이하의 잔골재, 그리고 5 mm~20 mm의 굵은골재(JIS A 5005)를 사용하였다. 두 개의 실험체 철근은 모두 SD295 A, D10을 사용하였다. RC 상판 실험체의 치수는 전장 1,470 mm, 지간 1,200 mm, 두께 130 mm로 한다. 철근은 복철근 배치로 하며, 인장측의 주철근(축 직각 방향)에는 D10을 100 mm 간격으로 배치하고, 유효높이 105 mm로 한다. 배력철근(축 방향) 또한 D10의 철근을 100 mm 간격으로 배치하고 유효높이 95 mm로 한다. 또한 압축 측의 철근량은 인장 측의 철

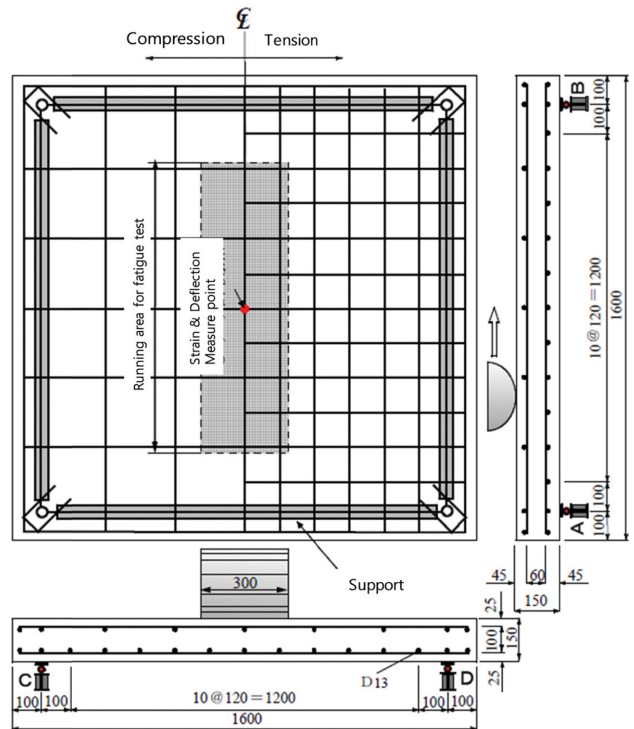
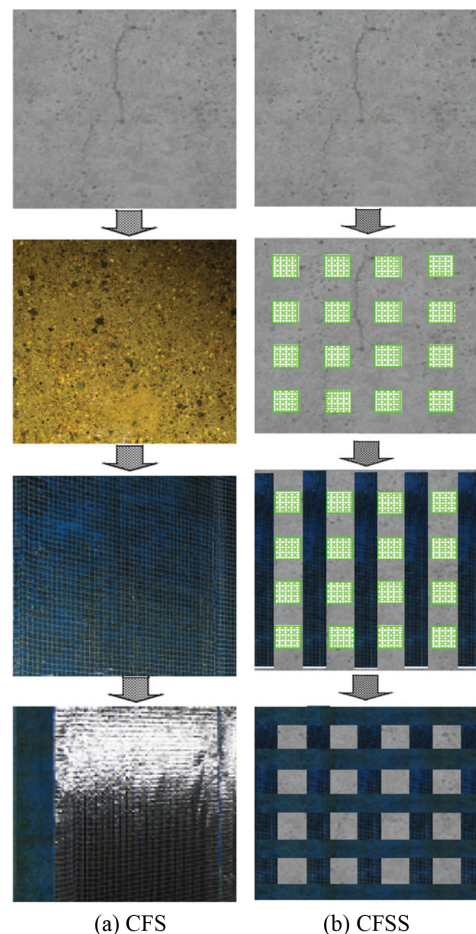


Fig. 1. Outline of RC slab [7].



(a) CFS

(b) CFSS

Fig. 2. Adhesion processing of CFS and CFSS [7].

근량의 1/2을 배치한다. 여기서, 실험체의 치수 및 철근의 배치를 Fig. 1에 나타내었다.

2.3. CFS 및 CFSS

본 실험에 사용하는 CFS는 단위중량 200 g/m², 설계 두께 0.111 mm, 인장강도 4,420 N/mm², 영계수 235 kN/mm²의 재료특성을 보유한 섬유를 사용하고, CFSS는 단위중량 600 g/m², 설계 두께 0.333 mm, 인장강도 4,310 N/mm², 영계수 245 kN/mm²의 재료특성을 보유한 섬유를 사용하였다. 여기서, CFS 및 CFSS의 접착 보강 순서를 나타낸 모식도를 Fig. 2에 나타내었다.

2.4. 등가주행횟수

윤하중 피로실험은 주행 20,000회 마다 하중을 증가시키기 때문에 기준 하중과 재하 하중 그리고 실험 주행 횟수의 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 m에는 마쓰이가 제안[11]하는 12.7을 적용하였다.

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

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. 피로실험 결과 및 고찰

3.1. 등가주행횟수

선행 연구를 통해 얻은 무보강 RC 상판, CFS 허부접착보강 RC 상판의 등가주행횟수의 결과[12] 및 CFSS 격자접착보강 RC 상판의 등가주행횟수의 결과를 추가하여 Table 1에 나타내었다.

먼저, 무보강 RC 상판 공시체 RC-1의 등가주행횟수는 11.2 × 10⁶회, RC-2의 등가주행횟수는 14.9 × 10⁶회이며, 평균등가주행횟수 N_{eq}는 12.8 × 10⁶회로 산출되었다. 다음으로 CFS 접착보강 RC 상판 공시체 CFS-1의 등가주행횟수는 258.1 × 10⁶회, RC-2의 등가주행횟수는 269.5 × 10⁶회이며, 평균등가주행횟수 N_{eq}는 263.8 × 10⁶회로, 무보강 RC 상판 공시체에 비하여 약 20.6배의 내피로성이 높은 것으로 분석되었다. 또한, CFSS 격자접착보강 RC

Table 1
Number of equivalent cycles and Reinforcement number of equivalent cycles

Test specimen	Total number of equivalent cycles	Average number of equivalent cycles	Number of equivalent cycles ratio
RC-1	11,238,624	12,814,782	-
RC-2	14,390,941		
CFS-1	258,123,028	263,822,131	20.6
CFS-2	269,521,233		
CFSS-1	302,173,738	324,110,759	25.3
CFSS-2	346,047,779		

상판 공시체 CFSS-1의 등가주행횟수는 302.1 × 10⁶회, CFSS-2의 등가주행횟수는 346.0 × 10⁶회이며, 평균등가주행횟수 N_{eq}는 324.1 × 10⁶회로 산출되었다. CFSS-1,2의 평균등가주행횟수를 분석한 결과 CFSS-1,2가 무보강 RC 상판 공시체에 비해 내피로성이 약 25.3배 높게 분석되었고, CFS 접착보강 RC 상판 공시체와 CFSS 격자접착보강 RC 상판 공시체의 평균등가주행횟수를 비교하여 본 결과 CFSS 격자접착보강의 공시체가 내피로성이 약 1.2배 높아 보강효과가 좋은 것으로 분석되었다. 따라서 CFS 접착보강 RC 상판 실험체와 마찬가지로 신재료, 신공법의 CFSS 격자접착보강방법의 등가주행횟수가 CFS 접착보강방법의 등가주행횟수를 상회하는 결과가 나타났다.

3.2. 등가주행횟수와 처짐의 관계

본 실험의 모든 실험체에 대한 등가주행횟수와 처짐의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 나타내는 바와 같이 무보강 RC 상판 공시체 RC-1,2는 처짐 3.5 mm, 즉 상판지간 L의 1/400을 넘는 부근부터 처짐의 증가가 현저하게 나타났다. 여기서, 공시체가 상판지간 L의 1/400에 도달하는 시점의 등가주행횟수를 산출하면 RC-1은 3.61 × 10⁶회, RC-2는

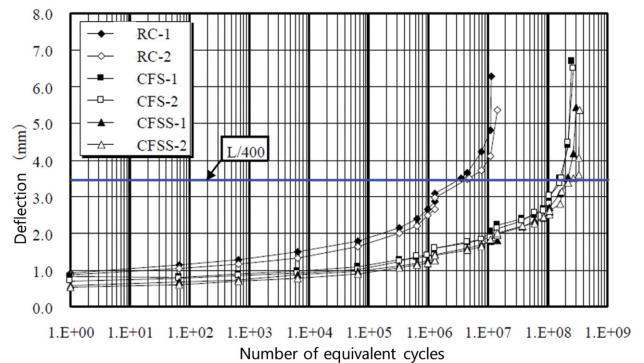


Fig. 3. Relationship between deflections and number of equivalent cycles.

4.91 × 10⁶회이며, 평균등가주행횟수는 4.26 × 10⁶회이다. 다음으로 CFS 접착보강 RC 상판 공시체 CFS-1,2는 처짐 3.5 mm를 지난 시점부터 처짐이 급격하게 증가하고, 파괴에 이르렀다. 공시체가 상판지간 L의 1/400에 도달하는 시점의 CFS-1,2의 등가주행횟수는 각각 165.40 × 10⁶회, 173.20 × 10⁶회로 평균등가주행횟수는 169.30 × 10⁶회이다. 무보강 RC 상판 공시체와 CFS 접착보강 RC 상판 공시체가 상판지간 L의 1/400에 도달하는 시점의 평균등가주행횟수를 비교하면 CFS 접착보강 RC 상판 공시체가 39.7배 증가하였다. CFSS 격자접착 보강 RC 상판 공시체 CFSS-1,2는 무보강 RC 상판 공시체에 비하여 처짐 및 균열의 발생이 억제되는 것을 확인할 수 있었다. CFSS-1,2 공시체가 처짐 3.5 mm에 한하는 시점의 등가주행횟수는 각각 215.90 × 10⁶회, 255.70 × 10⁶회, 평균등가주행횟수는 235.80 × 10⁶회로, 무보강 및 CFS 전면접착보강에 비하여 각각 55.3배, 1.4배 증가한 결과를 확인할 수 있었다.

3.3. 파괴형상

본 실험의 모든 실험체에 대한 파괴 형상을 Fig. 4에 나타내었다.

무보강 RC 상판 실험체 RC-1의 파괴형상은 Fig. 4(a)에 나타내듯이 인장 주철근 및 배력철근의 배치 위치에 2방향의 균열이 발생하고 격자 형태를 형성하고 있다. 또한 윤하중 재하 위치로부터 45°의 하부에는 다웰 효과의 영향에 의해 콘크리트의 박리가 넓은 범위에 나타나고 있다. 다음으로, CFS 전면보강 RC 상판 CFS-1의 파괴형상은 Fig. 4(b)에 나타내듯이 윤하중 재하 위치로부터 45°의 하부, 즉, 무보강 RC 상판의 다웰 효과의 영향을 받는 위치에 박리가 발생하였다. 여기서, 박리는 RC 상판의 콘크리트에서 발생한 것으로 판단되며, 파괴는 윤하중 주행중 편칭 전단 파괴되며, CFS의 파단은 발견되지 않았다. 또한, CFSS 격자접착보강 RC 상판

CFSS-1의 파괴형상은 Fig. 4(c)에 나타나 듯이 축 방향의 CFSS의 격자간에 균열이 많이 발생하였다. 그러나 CFS와 마찬가지로 CFSS의 파단은 보이지 않았다.

이상의 결과로 보아, 등가주행횟수는 증가하지만 균열과 박리는 감소하여 균열의 발생을 억제하여 내피로성이 증가하였다고 판단된다. 또한 CFSS를 격자 형태로 보강함으로써 보강 후의 균열 또는 박리를 확인하는데 유용하였다.

4. 결 론

1) CFS 접착보강 RC 상판 공시체 CFS-1,2의 평균등가주행횟수는 무보강 RC 상판 공시체 RC-1,2의 평균등가주행횟수에 비해 20.6배의 보강효과가 확인되었다. 또한 신재료, 신공법의 CFSS를 격자형으로 접착보강한 RC 상판 공시체 CFSS-1,2의 평균등가주행횟수는 무보강 RC 상판 공시체 RC-1,2에 비해 25.3배의 보강효과가 확인되었다. 또한, CFS 접착보강 RC 상판 공시체에 비교하여 약 1.2배의 보강효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

2) 처짐과 등가주행횟수의 관계는 모든 공시체에 대하여 상판 지간 L/400 즉, 처짐 3.5 mm에서 처짐이 급격하게 증가한 후 파괴에 이르렀다. 처짐이 상판 지간 L/400에 도달한 시점의 등가주행횟수를 비교하면, 무보강 RC 상판 공시체 RC-1,2의 평균등가주행횟수를 기준으로 CFS 및 CFSS 접착보강 공시체가 각각 39.7배 55.3배 증가하여, 처짐의 억제를 확인할 수 있었다.

3) 파괴형상은 무보강 RC 상판에 대하여 철근 배치 위치에 2방향 균열과 다웰 효과의 영향범위에 박리가 발견되었다. CFS 전면접착보강 RC 상판의 경우, 다웰 효과의 범위에 박리가 발견되었지만 CFS 전면접착으로 인해 균열이 억제되고 내피로성이 증가하였다. 그리고 CFSS 격자접착보강의 경우, 균열과 박리의 억제가 확인

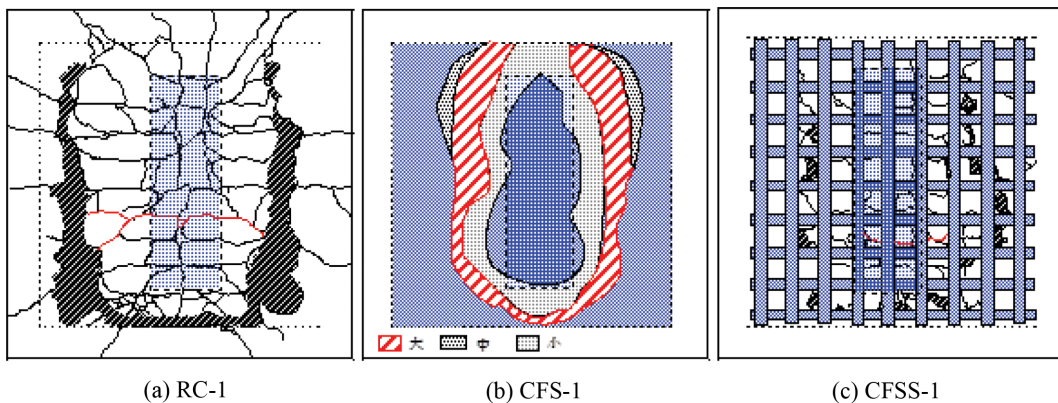


Fig. 4. Various failure modes of RC slabs.

되었고, 보강 후의 육안을 통한 점검이 용이하였다. 모든 실험체에 대하여 파괴는 운하중 주행 중 편칭 전단파괴가 발생되며, CFS 및 CFSS의 파단은 발견되지 않았다.

감사의 글

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

References

- [1] Chiba prefecture, Chiba environment and road maintenance unit, "Long-life repair plan report" (2010).
- [2] Ministry of land, Infrastructure, Transport and Tourism, "Trends in long-life repair plans for municipalities" (2011).
- [3] 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).
- [4] T. Abe, T. Kida, C.H. Won and A. Komori, "Evaluation of fatigue resistance and maintenance of RC slab reinforced by CFS under running wheel load", Cem. Sci. & Conc. Tech. 65 (2012) 493.
- [5] C.H. Won, T. Abe, M. Takano and A. Komori, "Evaluation of fatigue resistance of strengthened with CFS bonded RC slabs and proposal of an S-N curve equation", JSCE Committee of Struc. Eng. 59A (2013) 1075.
- [6] 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.
- [7] 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. Vol. 58A (2012) 1189.
- [8] 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.
- [9] W.C. Oh, B.S. Kim, C.S. Lim and W.C. Jang, "Preparation and properties of antibacterial activated carbon fiber", J. Korean Crys. Growth & Crys. Tech. 12 (2002) 165.
- [10] Japan Road Association, "Specifications for highway bridges · commentary", Japan Road Association, Part I. Common, Part II. Steel bridge (Maruzen, Tokyo, 2002).
- [11] M. Shigeyuki, "Highway bridge slab design·construction and maintenance", M. Shigeyuki (Morikita, Tokyo, 2007).
- [12] T. Abe, C.H. Won, T.H. Ahn, K.B. Shim and B.W. Jo, "Feasibility study on the fatigue characteristics of the reinforced CFS with self-healing repair methods for RC slabs", J. Cera. Process. Res. 16, Spe. (2015).