

Reinforcing effects of carbon fiber sheet by compressive strength differences on the 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 19, 2015)

(Revised December 4, 2015)

(Accepted December 18, 2015)

Abstract This study investigates the effect of carbon fiber sheet (CFS) and carbon fiber strand sheet (CFSS) on the fatigue resistance and compressive strength of RC slabs. The results of a comparison of the number of equivalent cycles between the CFS- and CFSS-reinforced RC slab test specimens obtained from a fatigue test indicate that the CFSS-reinforced RC slab has 1.2~1.3 times greater effect of reinforcement than the CFS-reinforced RC slab. This study also indicates that the fatigue resistance of the CFS- and CFSS-reinforced RC slabs is ensured when the compressive strength of concrete is not lower than the specified design strength prescribed in the Specifications for Highway Bridges but is not ensured when the compressive strength of concrete is lower than the specified design strength, although the effect of reinforcement is secured.

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

도로교 RC 상판의 압축강도 차이에 따른 탄소섬유시트 보강효과

원찬호, Tadashi Abe*, 안태호**,*†

한양대학교 부설산업과학연구소, 서울, 04763

*니혼대학교 토목공학과, 치바, 275-8575

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

(2015년 11월 19일 접수)

(2015년 12월 4일 심사완료)

(2015년 12월 18일 게재확정)

요약 본 연구에서는 교량의 보강재료로써 주목받고 있으며, 적용이 이루어지고 있는 탄소섬유시트(CFS) 및 새롭게 개발된 탄소섬유스트랜드시트(CFSS)를 이용하여 RC 상판 공시체에 접착보강하고, 보강을 통한 내피로성의 평가 및 RC 상판 공시체의 압축강도가 보강효과에 미치는 영향을 분석하였다. 운하중 피로 실험을 통해 내피로성을 평가한 결과, 기존의 CFS 전면접착보강 공법에 비해 새롭게 개발된 CFSS 격자접착보강 공법의 보강효과는 1.2~1.3배의 보강효과가 확인되었다. 또한, RC 상판의 압축강도가 보강효과에 미치는 영향을 분석한 결과, 압축강도가 시방서의 설계기준강도 이하일 경우에는 보강 후에도 내피로성은 평가되지 않았다. 따라서, 탄소섬유재료를 이용한 접착보강을 실시할 경우에는 RC 상판의 콘크리트 압축강도 및 사전조사를 실시할 필요가 있는 것을 알 수 있었다.

1. 서론

일본의 국토교통성[1, 2]은 2004년 교량점검요령(안) [1]을 발행하고, 지방공공 단체를 중심으로 교장 15 m

이상, 또한, 중요노선에 건설된 교량에 대하여 점검, 조사를 실시하였다. 그리고 2007년부터 교량의 연명화 및 교량 유지관리비용의 하향평준화를 목적으로 한 <도로교 장수명화 수선계획사업>을 책정하고 그 결과가 보고되고 있다[3]. 이에 따르면, 교량의 손상이 가장 심한 부분은 대형차량의 하중을 직접 받는 RC 상판의 피로로 인한 열화손상이 가장 심각하다고 평가한다. 또한, 수선 대상의 대상이 되는 RC 상판은 콘크리트의 경년열화로

†Corresponding author

Tel: +82-2-891-5380

Fax: +82-2-891-5381

E-mail: thahn@hanyang.ac.kr

인해 압축강도가 설계기준강도 이하로 하락한 사례가 보고되고 있다[4].

도로교 RC 상판의 성능회복에 대한 대책으로 경량 및 시공성이 우수하며 내화확성이 뛰어난 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheets: 이하, CFS)를 이용한 하면접착보강이 채용되고 있다[3, 5-7]. 또한, CFS와 동등한 재료 특성치를 보유하며, 더욱 시공성이 뛰어난 탄소섬유스트랜드시트(Carbon Fiber Strand Sheets: 이하, CFSS)가 새로운 보강재료로써 개발되었다. 하지만, CFSS에 관해서는 새롭게 개발된 재료로써 CFSS에 관한 연구는 일부의 연구기관에서만 평가 및 연구가 진행되고, 거의 보고되지 않고 있다[8-10].

본 연구에서는 RC 상판의 하면에 CFS를 전면접착보강한 실험체와 CFSS를 격자형으로 보강한 실험체를 제작하여, 운하중 피로실험을 실시하고 내피로성을 평가한다. 또한, 콘크리트의 압축강도를 설계기준강도 이상 및 이하로 제작하여 CFS 및 CFSS를 이용한 보강효과에 미치는 영향에 대해서 검증하고, RC 상판의 새로운 보강방법을 제시하고자 한다.

2. 탄소 섬유 보강 RC 상판의 피로실험

2.1. 실험체 개요

본 실험에서 사용한 실험체는 일본 도로교 시방서[11]의 규정에 기초하여 설계하고, 본 실험장치의 운하중 즉, 차륜 폭과 도로교 시방서가 규정하는 운하중 폭(500 mm)의 비율에 의해 모델화 한 것을 사용한다. 즉, 본 실험장치에 대한 운하중 폭이 250 mm의 차륜으로 실험하는 실험체를 1/2 모델(= 250/500)로 한다. 실험체에는 콘크리트의 압축강도가 다른 2타입을 제작하고 각각 A타입, B타입이라 칭한다.

2.2. RC 상판

A타입과 B타입 실험체의 콘크리트에는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하고, 5 mm 이하의 잔골재, 그리고 5 mm~20 mm의 굵은 골재(JIS A 5005)를 사용하였다. 여기서, 도로교 시방서에서는 도로교 RC 상판에 사용하는 콘크리트의 설계기준강도를 24 N/mm² 이상으로 지정하고 있다. 따라서, A타입의 실험체의 콘크리트에는 염해와 동해 그리고 유리석화 등에 의한 콘크리트의 경년열화를 고려하여 설계 기준강도를 24 N/mm² 이하(실험시 압축강도 18 N/mm²)로 배합하였다. 또한, B타입의 실험체의 콘크리트에는 설계기준강도를 24 N/mm² 이상(실험시 압축강도 35 N/mm²)을 목표로 하여 배합하였다. 철근에는

양 실험체 모두 SD295 A, D10을 사용하였다.

2.3. CFS 및 CFSS

본 실험에 사용하는 CFS는 단위중량 200 g/m², 설계 두께 0.111 mm의 연속섬유시트를 사용하고, RC 상판과 CFS의 접착강도를 높이기 위한 프라이머, CFS 전용의 접착제를 사용한다. 또한, CFSS는 단위중량 600 g/m², 설계 두께 0.333 mm의 것을 사용한다. CFS 및 CFSS의 재료 특성을 Table 1에 나타낸다.

2.4. 실험체 치수 및 철근 배치

A타입 및 B타입의 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. 배력 철근(축 방향) 또한 D10의 철근을 100 mm 간격으로 배치하고 유효높이 95 mm로 한다. 또

Table 1
Mechanical property of CFS and CFSS

Sheet name	Unit weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (kN/mm ²)
CFS	200	0.111	4,420	235
CFSS	600	0.333	4,310	245

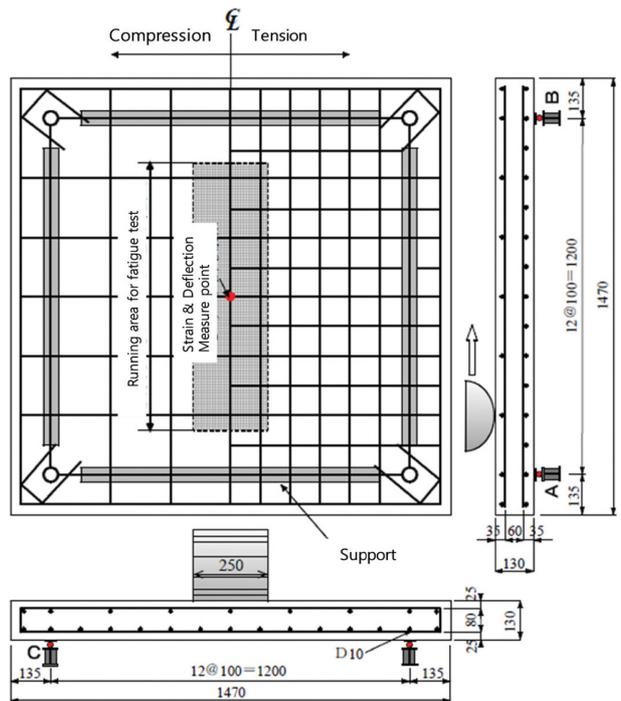


Fig. 1. Outline of RC slab [9].

한 압축 축의 철근량은 인장 축의 철근량의 1/2을 배치한다.

여기서, A타입의 RC 상판 실험체는 A-RC로 표기하며, B타입의 RC 상판 실험체는 B-RC로 표기한다. 실험체의 치수 및 철근의 배치를 Fig. 1에 나타낸다.

2.5. CFS 전면접착 및 CFSS 격자접착보강 방법

2.5.1. CFS 전면접착보강[12, 13]

CFS의 전면접착 범위는 실험체 지점간의 내측 1,100 mm × 1,100 mm의 범위로 한다. CFS의 전면접착보강 방법은 먼저, RC 상판 하면의 불순물의 제거 및 표면 처리를 한다(Fig. 2(a) 1), 2)). 표면 처리 후, CFS의 접착력을 높이기 위한 프라이머의 도포 및 양생을 한다(Fig. 2(a) 3)). 그 다음, CFS 전용 에폭시 계열 함침 수지를 이용하여 전면접착 시킨 후 12시간 이상 양생을 한다(Fig. 2(a) 4)). 같은 방법으로 2번째 층을 접착한다(Fig. 2(a) 5)). A타입과 B타입의 RC 상판 실험체에 각각 CFS 전면접착보강한 실험체의 명칭을 A-CFS 및 B-CFS로 한다.

2.5.2. CFSS 격자 접착 보강[12, 13]

CFS에 의한 접착보강 방법은 표면 처리 후, 프라이머의 함침처리와 양생을 필요로 하지만 CFSS에 의한 접착보강 방법의 경우는 프라이머의 처리가 불필요하며, 콘크리트의 표면 처리 후, 직접 CFSS를 접착하기 때문에 CFS 접착보강에 비해 시공의 간소화가 가능해진다. 또한 CFS 접착보강 방법은 상판 하면에 CFS를 전면으로 접착시키기 때문에 상판 상면으로부터 침투하는 우수

가 RC 상판과 CFS의 접착계면에 체수하고, 접착제의 경년열화가 예측되며, CFS 전면접착보강 후의 점검이 곤란하다. 이에 반해 CFSS 접착보강 방법은 CFSS를 격자형으로 접착하기 때문에 RC 상판 내부의 우수의 배출이 용이해지며, 접착보강 후의 점검 또한 용이해지는 장점이 있는 보강 방법이다.

CFSS의 격자접착보강 범위는 지점간 내의 1,100 mm × 1,100 mm의 범위로 접착하였다. CFSS의 배치량은 기본적으로 CFS를 2방향으로 전면접착보강한 양과 같은 양을 배치하였다. CFSS 격자접착보강 방법은 먼저, RC 상판의 하면을 콘크리트 샌더로 연마하고 불순물을 제거한다(Fig. 2(b) 1), 2)). 그리고 RC 상판 하면의 CFSS 격자접착 보강의 격자간 사이를 마스킹 테이프를 이용하여 접착한다(Fig. 2(b) 3)). 그 후, 마스킹 한 이외의 면에 CFSS를 축 직각 방향으로 배치하고, CFSS의 발 사이의 공간으로 에폭시계열 수지 접착제를 침투 시키며 접착한다(Fig. 2(c) 4)). 축 직각 방향의 1층 부를 접착시킨 후, 이어 축 방향의 2층 부를 같은 방법으로 접착시켜 격자 형태를 만든다(Fig. 2(d) 5)). 마지막으로 마스킹 테이프를 제거한다. A타입과 B타입의 RC 상판 실험체에 각각 CFSS 격자 접착 보강한 실험체의 명칭을 A-CFSS 및 B-CFSS로 한다.

3. 실험 방법 및 등기주행횟수

3.1. 윤택중 피로실험

윤택중 주행을 통한 피로실험에 의한 CFS 전면접착보

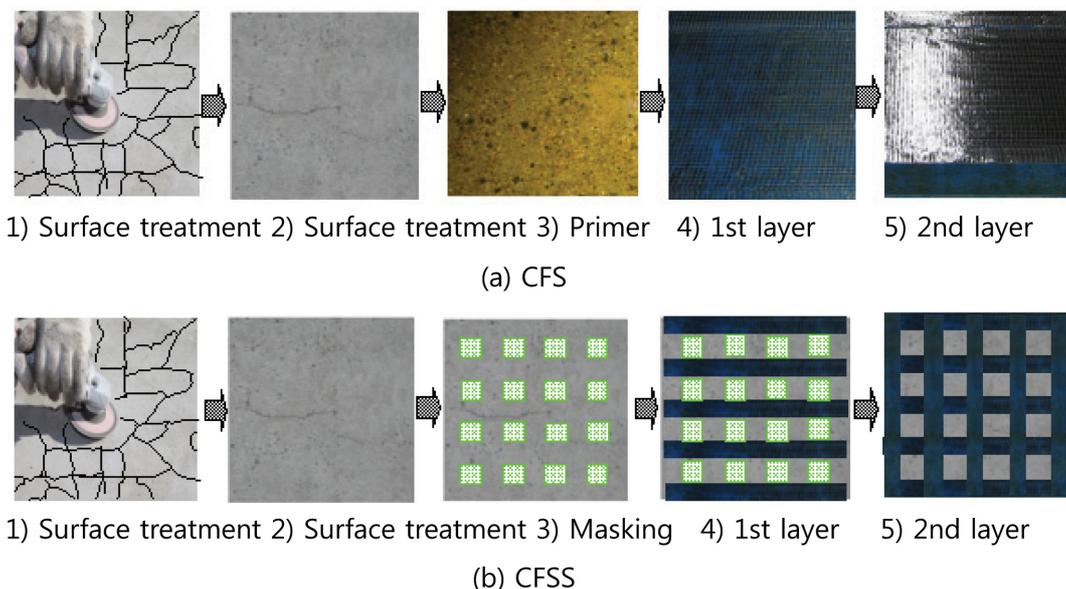


Fig. 2. Adhesion processing of CFS and CFSS [12, 13].

강 RC 상판 및 CFSS 격자접착보강 RC 상판의 보강효과 및 내피로성의 평가는 주행 20,000회마다 하중을 단계적으로 증가시키므로 기준하중에 대한 실험하중과 실험주행 횟수로부터 등가주행횟수를 산출하여 평가한다.

3.2. 하중 재하 조건

A타입의 실험체는 하중 80 kN부터 주행을 시작하였다. B타입의 실험체는 60 kN부터 100 kN까지 20,000회 주행마다 하중을 20 kN씩 증가시켰다.

3.3. 등가주행횟수

윤하중 피로실험은 주행 20,000회마다 하중을 증가시키기 때문에 기준 하중과 재하하중 그리고 실험주행횟수의 관계로부터 등가주행횟수(N_{eq})를 산출, 보강효과 및 내피로성을 평가하였다. 윤하중 주행에 의한 등가주행횟수 N_{eq} 는 마이너 측에 따른다고 가정하고 다음 식으로 나타낼 수 있다. 또한, 식-1에 적용하는 S-N 곡선의 기울기의 역수 m 에는 마쓰이가 제안[14]하는 12.7을 적용하였다.

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

여기서, N_{eq} : 등가주행횟수(회), P_i : 재하 하중(kN), P : 기준 하중(60 kN), n_i : 실험 주행 횟수(회), m : S-N 곡선의 기울기의 역수(12.7)

4. 피로실험 결과 및 고찰

선행 연구를 통해 얻은 콘크리트의 압축강도가 35 N/mm²의 RC 상판 공시체 및 CFS 접착보강 RC 상판의 등가주행횟수 결과[15] 및 콘크리트의 압축강도가 18 N/mm²의 RC 상판 공시체, CFS 전면접착보강 RC 상판 공시체의 등가주행횟수의 결과를 Table 2에 나타낸다.

Table 2
Number of equivalent cycles (N_{eq})

Test specimen	Total number of equivalent cycles	Average number of equivalent cycles	Number of equivalent cycles ratio
A-RC-1	29,462	29,462	-
A-CFS-1	481,724	481,724	16.4
A-CFSS-1	768,262	629,201	21.4
A-CFSS-2	490,140		
B-RC-1	7,346,848	7,938,030	-
B-RC-2	8,529,213		
B-CFS-1	163,317,396	148,256,151	18.7
B-CFS-2	133,194,905		
B-CFSS-1	184,410,488	184,410,488	23.2

mm²의 RC 상판 공시체, CFS 전면접착보강 RC 상판 공시체, CFSS 격자접착보강 RC 상판 공시체의 등가주행횟수의 결과를 Table 2에 나타낸다.

4.1. A타입

콘크리트의 압축강도가 18 N/mm²의 A타입의 무보강 RC 상판 A-RC-1의 등가주행횟수는 29,462회이다. CFS 전면접착보강 RC 상판 A-CFS-1의 등가주행횟수는 481,724회로, 무보강 RC 상판 A-RC-1의 16.4배의 보강효과가 확인되었다. CFSS 격자접착보강 RC 상판 A-CFSS-1의 등가주행횟수는 768,262회, A-CFSS-2의 등가주행횟수는 490,140회이며, 평균등가주행횟수는 629,201회로 무보강 RC 상판 A-RC-1의 21.4배의 보강효과가 확인되었다.

또한, CFS 전면접착보강 RC 상판 A-CFS-1의 등가주행횟수와 CFSS 격자접착보강 RC 상판 A-CFSS-1,2의 평균등가주행횟수를 비교하면, A-CFSS-1,2의 평균등가주행 횟수가 A-CFS-1의 등가주행횟수에 비하여 1.30배의 보강효과가 확인되었다.

4.2. B타입

콘크리트의 압축강도가 35 N/mm²의 B타입의 RC 상판 B-RC-1,2의 등가주행횟수는 각각 7.3×10^6 회, 8.5×10^6 회이며, 평균 등가주행횟수는 7.9×10^6 회이다. 그리고 B타입의 무보강 RC 상판에 CFS 전면접착보강한 B-CFS-1,2의 등가주행횟수는 각각 163.3×10^6 회, 133.1×10^6 회이며, 평균 등가주행횟수는 148.2×10^6 회로 무보강 RC 상판 실험체 B-RC-1,2의 등가주행횟수에 비하여 18.7배의 보강효과가 확인되었다. 또한, B-CFSS-1의 등가주행횟수는 184.4×10^6 회로 B-RC-1,2의 평균 등가주행횟수에 비해 23.2배, B-CFS-1,2의 평균 등가주행횟수에 비해 1.24배로 CFSS 격자접착보강 방법은 CFS 전면접착보강 방법의 보강효과 이상의 내피로성이 평가되었다. 따라서 CFS에 비하여 시공의 간소화 및 상판 상면으로부터 침투하는 우수 배출의 가능성을 지니도록 새롭게 개발한 CFSS를 이용한 CFSS 격자접착보강 방법은 CFS 전면접착보강 이상의 보강효과를 지니는 것이 확인되었다.

다음으로, 콘크리트의 압축강도의 차이로 인한 등가주행횟수를 비교해보면, 콘크리트의 경년열화 등을 고려하여 압축강도가 18 N/mm²의 A타입의 무보강 RC 상판 실험체의 등가주행횟수는 건전한 콘크리트를 고려하여 압축강도가 35 N/mm²의 B타입의 무보강 RC 상판 실험체의 등가주행횟수의 약 0.4 % 정도로 확인되었다. 그리고 CFS 전면접착보강한 RC 상판 실험체 A-CFS-1의

등가주행횟수는 B-CFS-1,2의 평균 등가주행횟수의 약 0.3%, CFSS 격자접착보강한 RC 상판 실험체의 등가주행횟수 또한 약 0.3% 정도로 나타났다. 따라서, A타입 및 B타입의 모든 실험체에 대하여 CFS 전면접착보강 및 CFSS 격자접착보강 방법의 보강효과는 확인되었지만 내피로성의 효과는 얻을 수 없었다. 따라서 탄소섬유 재료를 이용한 보강을 시공하기 전, 도로교 시방서에서 규정하는 설계기준강도 이상의 콘크리트 압축강도를 확보할 필요가 있다.

5. 결 론

1) 유리석화 및 동해, 염해로 인해 콘크리트의 압축강도가 설계기준강도 이하로 저하된 경우를 고려하여 제작한 A 타입의 실험체에 CFS 전면접착 및 CFSS 격자접착 보강을 시행한 결과, 각각 16.4배, 21.4배의 보강효과가 확인되었다. 하지만, 건전한 콘크리트를 고려하여 제작한 B 타입의 실험체에 비교하면 등가주행횟수는 약 0.3%~0.4% 정도로, 내피로성은 평가되지 않았다. 따라서, 피로나 열화가 심각한 RC 상판에 대해서는 보강 전 압축강도 등의 사전조사가 필요하다고 생각된다.

2) 등가주행횟수는 무보강 RC 상판 실험체를 기준으로 비교, 평가하였다. CFS 전면접착의 경우, A타입은 16.4배, B타입은 18.7배 등가주행횟수가 증가하였고, CFSS 격자접착보강의 경우는, 모든 타입에 대하여 각각 21.4배, 23.2배 등가주행 횟수의 증가가 확인되었다. 이로 인해, CFS 전면접착보강의 보강효과가 확인되었고, 시공의 생력화 및 육안을 통한 점검이 가능하도록 새롭게 개발한 CFSS 격자접착보강 또한 CFS 전면접착보강의 동등 이상의 보강 효과가 확인되었다.

감사의 글

본 연구 논문과 관련된 (주)세릭(SERIC Co. Ltd.) R&D센터의 연구관계자 여러분께 감사 드립니다. (www.seric.co.kr)

References

- [1] Ministry of land, Infrastructure, Transport and Tourism, "Periodic bridge inspection (Plan)", Ministry of land, (Ministry of land, Tokyo, 2004).
- [2] Ministry of land, Infrastructure, Transport and Tourism, "Trends in long-life repair plans for municipalities", Ministry of land, (Ministry of land, Tokyo, 2011).
- [3] Chiba prefecture, Chiba environment and road maintenance unit, "Long-life repair plan report", Chiba environment and road maintenance unit, (Chiba prefecture, Chiba, 2010).
- [4] Japan Road Association, "Road bridge repair and reinforcement casebook", Japan Road Association, (Maruzen, Tokyo, 2009).
- [5] 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).
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Japan Road Association, "Specifications for highway bridges · commentary", Japan Road Association, Part I. Common, Part II. Steel bridge, (Maruzen, Tokyo, 2002).
- [12] C.H. Won, T. Abe and T.H. Ahn, "Mechanical properties of carbon fiber sheet and carbon fiber strand sheet based on carbon fibers for the reinforcement of highway bridge RC slabs", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 25 (2015) 290.
- [13] C.H. Won, T. Abe, T.H. Ahn and D.K. Kim, "Relationship between fatigue resistance and fracture behavior of the carbon fiber sheet and carbon fiber strand sheet reinforced RC slabs", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 25 (2015) 294.
- [14] M. Shigeyuki, "Highway bridge slab design · construction and maintenance", M. Shigeyuki, (Morikita, Tokyo, 2007).
- [15] C.H. Won, T. Abe, T.H. Ahn, K.B. Shim and B.W. Jo, "A study on the reinforced CFS using the concept of self-healing repair methods in bottom side for damaged highway RC slabs", J. Cera. Process. Res. 16, Spe.1 (2015).