

# 반복하중을 받는 교량바닥판의 보강을 위한 탄소섬유쉬트의 적용성에 대한 실험적 연구

## A Experimental Application of Carbon Fiber Sheet for Strengthening Bridge Decks received fatigue loads

심 종 성\*      오 홍 섭\*\*      김 진 하\*\*\*      김 성 엽\*\*\*  
Sim, Jong Sung      Oh, Hong Seob      Kim, Jin Ha      Kim, Sung Yub

### ABSTRACT

This study was performed experiment for strengthened bridge decks with isotropic carbon fiber sheets received fatigue loading, and compared with fatigue behavior of unstrengthened bridge decks. By the results, this study was examined effect of increasing strengthened to phase life cycles of bridge deck for fatigue loading and application of the punching shear theory of bridge deck strengthened by carbon fiber sheet.

### 1. 서 론

노후화된 교량상판의 성능향상을 위하여 보강판을 상판하부에 부착시키는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이들 연구의 대부분이 정적구조시험의 결과이며 실제 교량상판의 구조거동을 모사했다고 볼 수 없다. 즉, 실제 교량상판은 동적 반복하중에 의해 손상 및 열화가 누적되는 부재이며 이를 보강한 경우에 대한 연구는 피로시험을 통한 구조거동 분석이 수행되어야 한다. 기존의 연구에서 탄소섬유로 보강된 교량 상판의 정적 시험결과, 보강효과는 주철근 방향의 일방향 전면보다 이방향 등방보강이 우수한 것으로 나타났다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서는 이방향으로 등방보강된 교량 상판에 대하여 피로성능 시험을 실시하였고, 무보강시험체에 대한 피로시험시 산출된 거동특성과 보강한 시험체의 피로성능 시험을 통한 거동특성을 서로 비교함으로써 피로수명 연장측면에서의 보강효과를 검증하였고, 공용하중 DB18 설계2등급교량으로 설계된 교량바닥판을 DB24 설계1등급 교량바닥판으로 사용 위하여 교량 상판을 탄소섬유쉬트의 보강에 의하여 성능 향상 시켰을 때, 피로하중에 대한 안전성을 실험 적으로 검토하고자 하였고, 보강된 교량 바닥판의 편칭전단 해석법의 적용성을 검증하고자 하였다.

### 2. 실 험

시험에 사용한 콘크리트의 재령28일 압축강도는  $240\text{kgf/cm}^2$ 으로 나타났으며, 주철근과 배력철근은 철근의 항복응력  $3000\text{kgf/cm}^2$ 인 D16철근을 배근하였다. 시험체는 현재 공용중인 DB18 설계2등급 교량바닥판과 동일한 강성을 갖도록 도로교 구조설계기준에 의하여 그림1과 같이설계, 제작 하였으며, 보강 시험체는 그림2와 같이 이방향으로 등방보강하였다. 시험시 하중가력은 차량 후륜의 접지면적과 동일

\* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

\*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사후 과정

\*\*\* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

하도록 25×50cm의 재하판을 제작하여 2 H<sub>2</sub>로 단진재하 하였다. 또한 변위측정기는 교량 바닥판의 중앙부, 1/4, 거더부에 설치하였으며, 상하부 주철근과 배력철근에 변형률계이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 본 연구에 사용된 시험체 변수는 표1과 같이 무보강 시험체가 CON90, CON70, CON40이고, 보강시험체는 CFS80, CFS70 그리고 CFS60이다. 여기서, '90' 및 '70' 등은 응력수준(%)으로서 무보강 시험체와 보강 시험체의 정적실험결과 각각의 파괴하중의 퍼센트 비율이다.

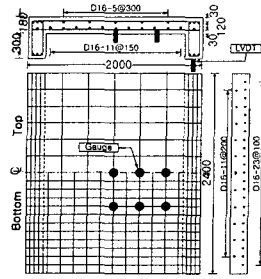


그림 1 시험체 제원(mm)

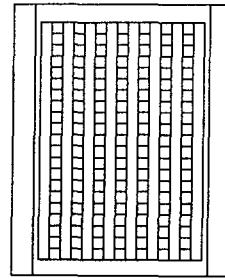


그림 2 보강방법

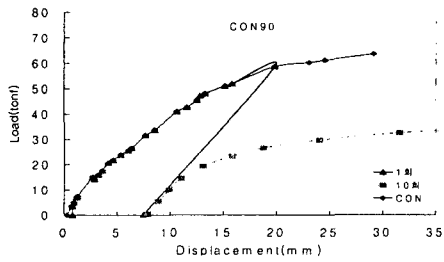
표 1 시험체의 실험변수

피로시험	시험체명	반복재하하중(tonf)	비고	정적시험시 파괴하중
Specimen	CON40	26	파괴하중의 40%	64tonf
	CON70	45	파괴하중의 70%	
	CON90	58	파괴하중의 90%	
	CFS60	44	파괴하중의 60%	73.5tonf
	CFS70	52	파괴하중의 70%	
	CFS80	59	파괴하중의 80%	

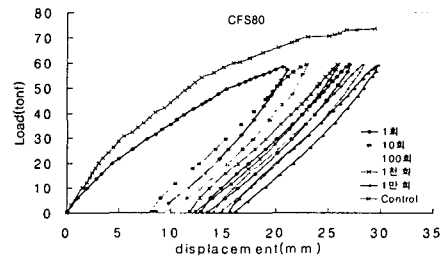
### 3. 실험결과

#### 3.1. 반복횟수에 따른 하중-슬래브중심변위 관계

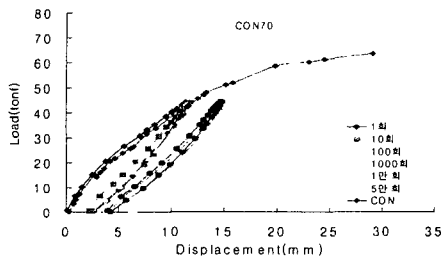
그림 3은 정적실험결과의 하중-슬래브중심변위 관계와 피로거동의 반복횟수에 따른 시험체별 하중-슬래브중심변위 관계를 누적하여 나타낸 것이다. 반복응력수준이 상대적으로 낮은 CON40시험체와 CFS60시험체를 제외하고는 모든 시험체가 피로 펀칭 파괴되었고, CON40시험체와 CFS60시험체는 100만회까지 반복재하후 정적하중을 재하하여 파괴시켰다. 각 시험체의 파괴시 반복횟수는 표2에 나타내었다. 피로성능시험의 하중-변위 곡선은 초기재하시 최대변위 및 영구변위가 비교적 크게 일어났으며, 이후 거의 일정하게 증가하는 양상을 보였다. 정적성능실험결과의 파괴시 변위와 비교하여 볼 때, 피로파괴 직전의 누적변위는 거의 비슷한 변위에서 파괴에 이르렀다. 이에 탄소섬유슈트로 보강된 교량바닥판은 무보강 시험체와 비슷한 거동을 하고 있으며, 연성을 확보하는 것으로 나타났다.



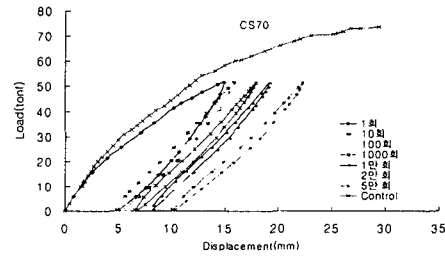
(a) CON90



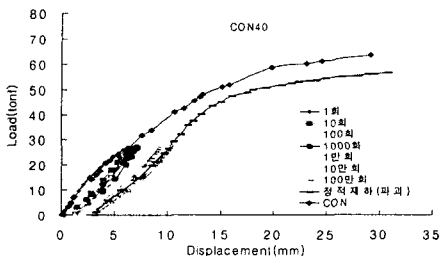
(d) CFS80



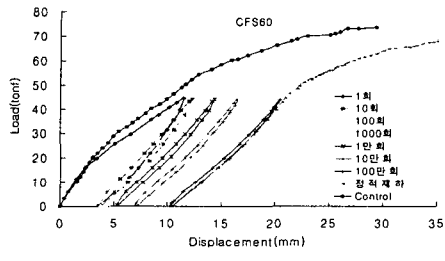
(b) CON70



(e) CFS70



(c) CON40



(f) CFS60

그림 3 각 시험체별 반복횟수에 대한 하중-슬래브중심 변위 누적곡선

표 2 시험체의 파괴시 반복횟수

무보강시험체의 파괴시 반복횟수		보강시험체의 파괴시 반복횟수	
CON90	10회	CFS80	19,836회
CON70	68,834회	CFS70	90,074회
CON40	100만회 재하후 정적파괴 (파괴하중: 57.5tonf)	CFS60	100만회 재하후 정적파괴 (파괴하중: 68.2tonf)

### 3.2. 반복횟수에 따른 컴플라이언스(compliance) 변화

컴플라이언스는 균열신장의 함수로 컴플라이언스가 클수록 균열이 진전되었음을 나타낸다. 그림 4에서 시험체의 컴플라이언스는 초기재하시 크게 증가하고 이후 일정량씩 조금씩 증가하다가 파괴직전에는 급격히 증가하는 양상을 보였다. 이는 초기 재하시 다수의 균열이 발생하여 강성이 크게 저하되었고 이후에는 일정량의 강성을 유지했다. 10회 재하 이후에는 무보강 시험체와 비교하여 보강시험체의 기울기가 완만하다. 이에 보강재가 반복하중에 의한 균열신장제어 측면에서 효과가 있는 것으로 나타

났다.

### 3.2. 탄소섬유쉬트로 성능 향상된 교량 바닥판의 실험적 피로수명 예측 및 피로 안전성 검토

그림 5는 무보강 시험체와 보강 시험체의 S-N 선도이고, 회귀분석식은 다음과 같다.

무보강 시험체 :  $\text{Stress Level}(y) = -0.0241 \cdot \ln(N) + 1.0045$

보강 시험체 :  $\text{Stress Level}(y) = -0.0257 \cdot \ln(N) + 0.982$

피로한계는 피로 시험시의 반복 회수며, 콘크리트 구조물의 경우 100만회 이상일 경우이다. 본 연구에서의 피로 한계는 무보강 시험체의 경우 63%이며 보강 시험체의 경우는 67%이다. 탄소섬유쉬트 보강된 교량바닥판은 정적성능실험에서의 내하력을 향상시켜 줄뿐만 아니라, 피로 수명과 피로한계 응력수준을 향상시켜줄 수 있었다. 따라서, 현재 공용중인 DB18 설계 2등급 교량 바닥판을 탄소섬유쉬트로 보강하여 내하력 및 피로강도를 증가시켜 DB24 설계 1등급 교량 바닥판으로 사용이 가능한 것으로 나타났다.

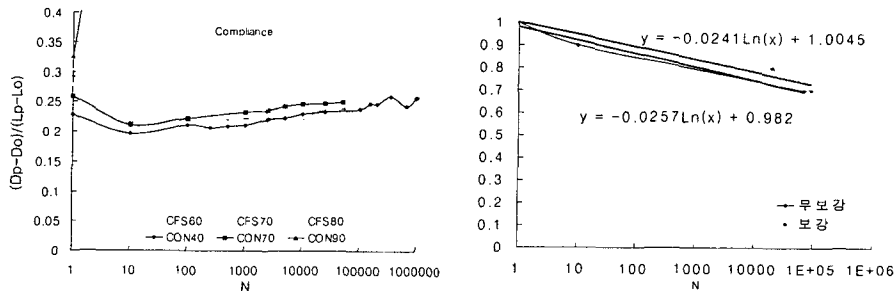


그림 4 무보강 및 보강시험체의 컴플라이언스변화 그림 5 무보강 및 보강 시험체의 S-N Curve

### 3.4. 탄소섬유쉬트로 성능향상된 교량바닥판의 편칭전단 해석법 적용성 검토

본 실험에서 모든 시험체의 파괴양상이 편칭파괴로 나타났다. 이에 공용하중 DB18 설계2등급으로 설계된 교량바닥판을 탄소섬유쉬트 보강에 의해 DB24 설계 1등급 교량바닥판으로 사용할 때의 편칭 전단 해석방법의 적용성을 검토하였다, 보강재의 보강제원은 표3에 나타내었다.

표 3 탄소섬유쉬트의 보강제원

물 성	섬유의 강도( $f_p^*$ )	35,500 kgf/cm <sup>2</sup>
	섬유파괴시 변형률( $\epsilon_p^*$ )	0.015
	섬유의 탄성계수( $E_p$ )	$2.35 \times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>
	철근의 탄성계수( $E_s$ )	$2.00 \times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>
보강방법	보강재 격자간격	100mm
	섬유 두께	0.11mm×2겹
	격자당 섬유 폭	100mm
	보강형식	등방성 보강

외부 부착방법으로 성능향상된 교량 바닥판의 편칭전단 강도 해석법은 다음과 같이 세가지 편칭강도의 합으로 표현된다. [심중성, 2001]

$$V_{pun} = V_{c1} + V_{c2} + V_{dow}$$

여기서  $V_{c1}$ 는 주철근 이상에서의 콘크리트 편칭내력

$V_{c2}$ 는 외부부착공법의 적용에 따른 주철근

이하에서의 콘크리트 편칭내력

$V_{dow}$ 는 주철근 및 배력철근의 다우얼 작용

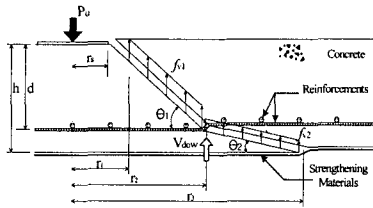


그림 6 편칭전단 파괴형태

$$V_{c1} = \pi(r_1 + r_2)s_1f_{t1} = \pi(r_1 + r_2)s_1f_{t1}^{2/3}\xi\mu\eta$$

여기서,  $r_1 = r_s + 0.1dcot\theta_1$ ,  $r_2 = r_s + dcot\theta_1$ ,  $s_1 = \sqrt{(r_2 - r_1)^2 + (0.9d)^2}$  [그림6]

$$\xi = \begin{cases} -0.1\rho^2 + 0.46\rho + 0.35 & \rho < 2 \text{ percent} \\ 0.87 & \rho \geq 2 \text{ percent} \end{cases}$$

여기서,

$\rho$ 는 철근비( =  $A_s/bd$ , %)

$d_a$ 는 굵은골재 최대치수(mm)

$$\mu = 1.6(1 + d/d_a)^{-1/2}$$

$$\eta = \begin{cases} 0.1(r_s/h)^2 - 0.5(r_s/h) + 1.25 & r_s/h < 2.5 \\ 0.625 & r_s/h \geq 2.5 \end{cases}$$

$$f_{t1} = 0.3 f_{ck}^{2/3} \text{ [MPa] [Raphael,1984]}$$

$$V_{c2} = \pi(r_2 + r_3)s_2f_{t2} = \pi(r_2 + r_3)s_2f_{t2}^{2/3}\xi\mu\eta$$

여기서,  $r_3 = r_2 + dcot\theta_2$ 이고,  $s_2 = \sqrt{(r_3 - r_2)^2 + (h - d)^2}$ 이다

$$f_{t2} = 0.183\sqrt{f_{ck}} \text{ [MPa] [前田와 松井,1984]}$$

$$\text{등가보강비 } \rho = \rho_{equ} = n_p\rho_p$$

여기서,  $n_p = E_p/E_s$ 이고,  $\rho_p = A_p/bh$ 이다.  $E_p$ 는 보강재의 탄성계수,

$E_s$ 는 주철근의 탄성계수,  $A_p$  단위폭 1m에 대한 보강재량

$$V_{dow} = \frac{1}{2} \sum \phi_s^2 \sqrt{f_{ck}f_y(1 - \zeta^2)} \sin \theta_1 \text{ [CEB-FIP간략식]}$$

여기서,  $\zeta = f_s/f_y$

이에 대한 해석결과는 다음과 같다.

표 4 항복선 이론 및 편칭전단 이론의 해석 결과

구 분	실험시 파괴하중	편칭전단 해석법에 의한 파괴하중	오차(%)
무보강 시험체	64 tonf	64.5 tonf	0.8
보강 시험체	73.5 tonf	72.7 tonf	1.1

위 해석결과에서 편칭전단 해석법은 정적성능 실험결과의 파괴하중과 거의 유사한 파괴 하중을 나타내고 있어, 탄소섬유쉬트로 보강된 후의 교량바닥판의 해석도 편칭전단 해석법의 정확한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

보강시험체는 피로거동시에 있어서도 무보강시험체의 하중-변위곡선이 비슷한 양상을 보이고 있어 탄소섬유쉬트로 보강된 교량바닥판은 무보강 시험체와 비슷한 거동을 하고 있으며, 연성을 확보하는 것으로 나타났다. 컴플라이언스 변화곡선의 10회 이후의 기울기가 무보강 시험체에서보다 작아 반복하중에 의한 균열신장 제어 측면에서 효과가 있고, 탄소섬유쉬트로 보강된 교량 바닥판은 정적성능실험에서 내하력 증가뿐만 아니라, S-N 선도로부터 피로한계가 무보강 시험체보다 약간 더 증가한 67%로 나타나 피로 수명과 응력수준을 향상시켜 피로강도가 증가하였다. 본 실험에 사용된 공용하중 DB18 설계2등급으로 설계된 교량 바닥판을 탄소섬유쉬트의 보강에 의해 DB24 설계1등급 교량 바닥판으로 사용했을 때, 반복하중에 대해서 안전성을 확보하는 것으로 나타났으며, 이에 본 실험에 사용된 공용하중 DB18 설계2등급으로 설계된 교량바닥판을 탄소섬유쉬트의 보강에 의해 반복하중에 대한 안전성을 높여 DB24 설계1등급 교량바닥판으로 사용하여도 무방한 것으로 나타났다. 그리고 편칭전단 해석법을 적용한 결과 보강후에도 편칭전단 해석법의 정확성이 검증되었다.

#### 감사의 글

이 연구는 (주)한국카본에서 주관하는 “탄소섬유쉬트로 보강된 교량바닥판의 정적 및 동적거동 효과 분석”을 수행함으로써 얻어진 결과이며, 저자들은 (주)한국카본의 후원에 감사의 뜻을 전합니다.

#### 참 고 문 헌

1. 심종성, 오홍섭 외 2인, “RC 교량상판의 휨 성능향상을 위한 탄소섬유 보강방법 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제10권 2호, 1998년 11월, pp.839-844.
2. 정란, 정상진 외 3인, “강판, 탄소섬유, 탄소섬유판으로 휨보강된 철근콘크리트 슬래브의 구조적 거동”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제10권 1호, 1998년 5월, pp.601-606.
3. 정영수, 김기봉, 이광명 외 5명, “국도상 노후교량의 성능개선기법 개발에 관한 연구”, 건설교통부, 1997. 12.
4. 심종성, 오홍섭 외 1인 “일방향 섬유로 성능향상된 교량 상판의 파괴거동 및 항복선 이론을 적용한 해석적 연구” 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 13권 1호, 2001년 5월 pp 81-86
5. 심종성, 오홍섭 외 1인 “외부부착공법으로 성능향상된 교량 바닥판의 편칭전단강도”, 대한 토목학회, 2001