

## 유리섬유보강재로 외부부착 보강된 교량 바닥판의 구조거동

오홍섭<sup>1)\*</sup> · 심종성<sup>1)</sup> · 최정환<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목 · 환경공학과

(2002년 4월 28일 원고접수, 2002년 11월 4일 심사완료)

## Structural Behavior on the Externally Strengthened Bridge Deck with Glass Fiber Reinforced Polymer

Hong-Seob Oh<sup>1)\*</sup>, Jong-sung Sim<sup>1)</sup>, and Jang-Hwan Choi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil and Environment Engineering, Hanyang University, Ansan, 425-791, Korea

(Received April 28, 2002, Accepted November 4, 2002)

### ABSTRACT

Since the deterioration of concrete bridge decks affect durability, safety, and function, structural rehabilitation of damaged concrete deck that was strengthened with Fiber Reinforced Polymer(FRP) is increasing the latest. But recent studies on the strengthened structures are focused on the static behavior, however only a few studies on the fatigue behavior are performed.

In this study, static and fatigue behavior of strengthened deck were performed on 11 deck specimens strengthened with sheet typed Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) that were reinforced by two different strengthening methods for the static test. A amount of strengthening material in the each direction such as transverse and longitudinal was adopted experimental variables for the static test and also the stress level of the static maximum load are adopted for the fatigue test. By the results of the experimental study, with respect to the strengthened decks, the resistance effect of crack propagation and effect of stress distribution are improved. In addition, the rate of variation of compliance decreased.

**Keywords :** fatigue behavior, glass fiber reinforced polymer, strengthened bridge deck

### 1. 서 론

교량 구조물은 사용연한의 증가, 환경요인으로 인한 자연적인 손상, 교통량의 증대, 차량하중의 증가 등으로 인해 콘크리트 바닥판의 균열과 부분적인 박락 및 국부편침 전단 파괴 등의 손상이 발생하게 된다<sup>[1,2]</sup>. 교량 바닥판의 경우에는 주행 윤하중을 직접받는 부재이기 때문에 다른 교량부재에 비해 피로하중의 영향을 받기가 쉬우며, 구조물의 수명이 급격하게 저하된다. 피로하중을 받는 철근콘크리트 바닥판의 파괴형태는 균열사이의 인장부에서 부착력 저하로 발생하는 휨-전단파괴와 지속적인 반복하중으로 인한 편침전단파괴의 두 가지 형태로 발생한다<sup>[3]</sup>.

손상된 교량 바닥판의 성능향상을 위하여 종래에는 강판을 외부에 부착시켜 보강을 실시하였으나, 부식과 자중 증가 등의 원인으로 일방향 섬유보강재를 콘크리트의 외부에 부착하는 섬유부착공법들이 적용되는 사례가 증가하고 있다. 섬유부착공법으로 바닥판을 성능향상시키는 경

우, 성능향상된 교량 바닥판의 보강변수에서 2방향 스트립(strip) 보강이 기존의 전면보강이나 일방향 보강에 비하여 균열제어 및 응력분산효과가 더 큰 것으로 기존연구에서 나타나고 있으며, 주철근과 배력철근방향 보강량에 따라서 교량 바닥판의 응력-변형도 및 파괴모드가 영향을 받게 된다<sup>[4]</sup>.

본 연구에서는 복잡한 형상에 유연히 대응할 수 있고, 경제적인 쉬트형태의 유리섬유강화폴리머(GFRP : glass fiber reinforced polymer)를 이용한 성능향상된 교량 바닥판의 보강효과 및 파괴거동 그리고 피로거동에 대하여 실험적으로 고찰하고자 하였다.

성능향상된 바닥판의 거동은 보강변수에 따라 파괴모드, 강도, 하중-변위, 하중-변형률, 보강재의 박리 등의 거동 특성이 변화하기 때문에 본 연구에서는 주철근 방향의 보강량을 조절하여 2방향 스트립 보강을 실시한 보강시험체 4개를 제작하였으며, 주철근과 배력철근방향으로 등방보강된 시험체 3개를 제작하여 차량의 후륜차량 접지면적과 동일한 재하판을 이용하여 피로시험을 수행하였다. 실교량 바닥판의 거동을 모사하기 위하여 공용중인 DB18 설계2 등급 교량의 재원과 철근배근형태가 유사한 교량 바닥판

\* Corresponding author

Tel : 031-400-4028 Fax : 031-400-5140

E-mail : opera69@chollian.net

의 시험체를 제작하여 거동분석을 수행하였다.

## 2. 시험계획 및 방법

### 2.1 시험체 제작

본 연구에 사용한 콘크리트는 재령 28일 압축강도가  $240 \text{ kgf/cm}^2$ 인 레디믹스트 콘크리트로서 슬럼프값은 12 cm로 측정되었다. 교량 바닥판에 사용한 주철근 및 배력철근의 항복응력은  $3,000 \text{ kgf/cm}^2$ 로서 D16 철근을 배근하였다. 성능향상을 위해 사용한 보강재, GFRP와 철근, 콘크리트 및 에폭시 수지의 역학적 성질은 Table 1과 같다.

실제 교량 바닥판과 유사한 일방향과 이방향 파괴 메커니즘을 모사하기 위하여 시험체는 도로교 구조설계기준에 준하여 공용중인 교량과 유사하게 설계, 제작하였다. 교량 바닥판의 두께는 설계 2등급 교량 바닥판과 동일하도록 18 cm로 제작하였으며, 폭과 길이는 각각 200 cm와 240 cm로 제작하였다. 또한 주철근과 배력철근은 기존 설계 2등급 교량을 기준으로 각각 D16@100과 D16@150을 배근하였으며, 교축방향의 배력철근은 설계기준상의 주철근 철근비의 67 %이하가 되도록 배근하였다<sup>5)</sup>. 일반적으로 거더교 바닥판의 경우 주철근 방향의 균열 이후, 배력철근 방향의 균열이 발달하여 바닥판을 관통하는 양상이 바닥판 손상의 주원인이 된다. 따라서 이와 유사한 거동양상을 획득하기 위하여 교량 바닥판을 지지하기 위한 거더를 Fig. 1과 같이 설계, 제작하였다.

Table 1 Material properties

	Yielding strength ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Ultimate strength ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Elastic modulus ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Ultimate strain (%)
Rebar	3,000	5,700	$2.00 \times 10^6$	-
GFRP	-	5,000	$0.252 \times 10^6$	2.0
Epoxy	-	880	$0.028 \times 10^6$	0.3
Concrete	-	240	$0.232 \times 10^6$	0.18

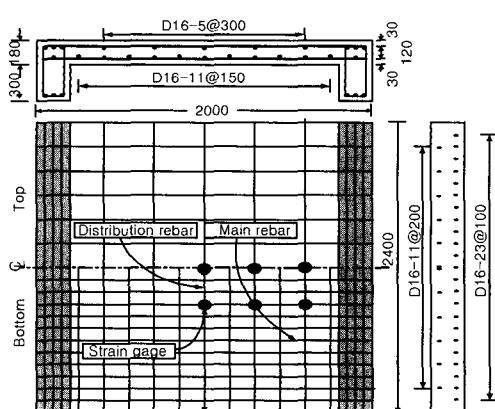


Fig. 1 Details of specimen (unit : mm)

### 2.2 시험변수

교량 바닥판의 균열은 작용하중 및 재하면의 크기, 반복 횟수 등에 의해 차이가 있으나 일반적으로는 일방향 균열 이후 이방향으로 균열이 전전된다<sup>6,7)</sup>. 본 연구에서는 Table 2 및 3과 같이 정적 및 피로 시험체를 설계하였다. GF-I-No.1과 GF-I-No.2 시험체의 경우 Fig. 2(a)와 같이 주철근과 배력철근방향에 대해서 동일한 간격의 스트립 보강을 실시하였으며, GF-O-No.1과 GF-O-No.2 시험체의 경우는 Fig. 2(b)와 같이 GF-I 시험체에 비해 주철근 방향의 보강량을 약 60 %정도를 보강하는 방법을 적용하였다. 보강재와 콘크리트 사이의 부착특성을 증진시키기 위하여 GF-I-No.2와 GF-O-No.2의 경우에는 에폭시함침과 함께 섬유앵커를 사용하여 모체콘크리트와 보강재를 일체화하고자 하였다.

바닥판의 설계특성상 교량 등급 및 차량의 절대하중의 크기에 따라 바닥판의 피로손상이 영향을 받기 때문에 무

Table 2 Static test variables

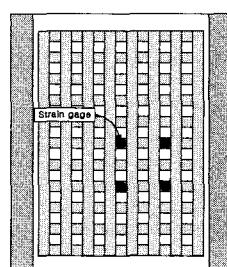
Specimen	Width of GFRP (mm)	Spacing of GFRP		Thickness (mm)	Fiber anchor
		M	D		
CON	-	-	-	-	-
GF-I-No.1	10	10	10	$1.3 \times 2\text{ply}$	×
GF-I-No.2	10	10	10	$1.3 \times 2\text{ply}$	○
GF-O-No.1	10	25	10	$1.3 \times 2\text{ply}$	×
GF-O-No.2	10	25	10	$1.3 \times 2\text{ply}$	○

M is main rebar direction

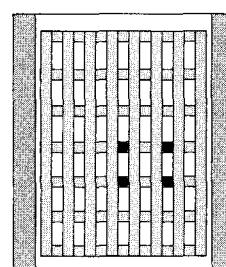
D is distribution rebar direction

Table 3 Fatigue test variables

Specimen	Stress level	
	Minimum level	Maximum level
CON 40	2 %(1.2 tonf)	40 %(25 tonf)
CON 70	2 %(1.2 tonf)	70 %(45 tonf)
CON 90	2 %(1.2 tonf)	90 %(58 tonf)
GF 40	2 %(1.4 tonf)	40 %(28 tonf)
GF 60	2 %(1.4 tonf)	60 %(42 tonf)
GF 80	2 %(1.4 tonf)	80 %(56 tonf)



(a) GF-I



(b) GF-O

Fig. 2 Strengthening details of specimens

보강시험체와 보강 시험체의 피로시험시 가급적 동일한 하중 크기에서의 피로하중 횟수 및 거동 특성을 평가하기 위하여 무보강시험체와 보강시험체의 응력수준을 달리하여 실험을 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 Table 3에 나타나는 것과 같이 동일한 하중상태에서의 성능향상된 교량 바닥판의 피로성능을 검증하기 위하여 무보강 시험체의 파괴하중의 40%, 70%, 90%에 해당하는 응력수준으로 반복하중을 재하하였으며, 최소응력수준은 정적 최대 내력의 2%로 고정하여 차량에 의한 충격과 진동을 최대한 위험측으로 모사하고자 하였다. 보강된 시험체는 실교량의 보강상황을 고려하여 섬유앵커를 사용하지 않고 예폭시만을 함침시켜 보강재를 부착하였으며, 이방향 등방성으로 보강한 시험체를 동적시험의 변수로 선정하여 파괴하중의 40%, 60%, 80%에 해당하는 응력수준으로 반복재하를 실시하여 피로거동에 대한 성능향상을 검증하고자 하였다. 이때에도 최저응력수준은 무보강시험체와 동일하게 2%로 고정하였다.

교량 바닥판의 정적 성능평가는 100 tonf의 하중가력을 사용하여 하중제어로 하중을 가력하였으며, 10 tonf 단위로 하중을 가력하여 하중 단계에 따른 탄성회복정도를 측정하였다. 또한 차량의 후륜 접지면적과 동일한 가로, 세로 각각  $25 \times 50$  cm의 강판을 이용하여 시험체 중앙면에 가력하였다. 콘크리트 교량 바닥판의 동적주기는 교량의 지간에 따라 2~7Hz로 변화하게 되며, 대체적으로 30 m 이상의 지간인 경우 2~3.7정도인 것으로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 피로하중주기를 동적주기와 유사한 2 Hz주기로 고정반복하중을 재하하였다<sup>8)</sup>. 국내의 피로한계는 200만회로 제시되어 있으나, Hawkins<sup>8)</sup>의 연구에 나타난 것과 같이 Miner이론에 의한 선형 피로한계는 70만회~300만회 사이에 존재하는 것이 일반적이기 때문에 개략적으로 50%의 피로파괴률을 갖는 100만회를 피로한계로 설정하였다.

### 3. 성능향상된 교량 바닥판의 정적 거동

#### 3.1 파괴양상

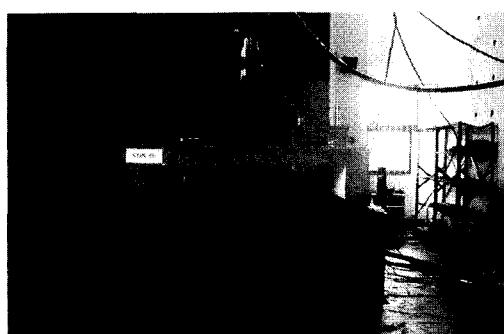
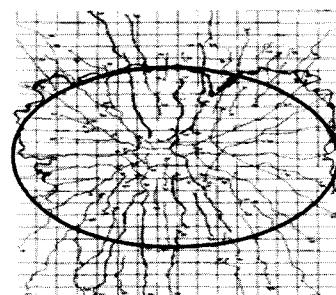


Fig. 3 Fatigue loading set-up

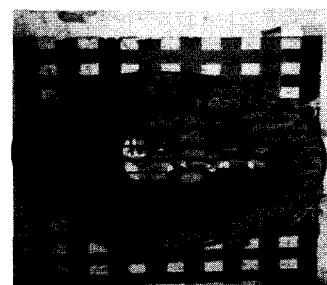
CON시험체의 파괴양상은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 초기 재하하중에 의하여 거더와 평행한 일방향 균열이 발생하였으며, 하중의 증가에 따라 2방향 균열이 진전된 이후에 세망화 되는 것으로 나타났다. 약 15 tonf에서 초기 일방향 균열이 발생하였으며, 45 tonf과 60 tonf에서 각각 주철근과 배력철근이 항복한 후 64 tonf에서 편침파괴되었다.

바닥판의 편침파괴는 상대적으로 많은 철근량과 바닥판의 높이 부족 등으로 인하여 발전된 균열과 균열사이에 발생된 콘크리트 스트립이 주철근 항복 이후 각각 분리되면서 콘크리트의 전단내력이 상실되었기 때문인 것으로 판단된다.

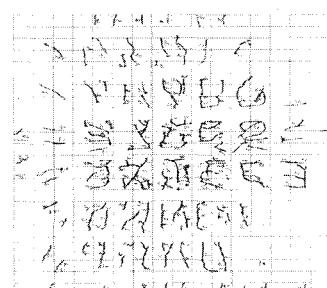
주철근과 배력철근방향으로 등방성으로 보강된 GF-I-No.1과 GF-I-No.2 시험체의 파괴형태는 Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 초기에 일방향으로 균열이 발생한 이후에 이방향 거동이 발생하였으며, 균열은 섬유부착면을 따라서 하중증가에 따라 계속해서 진전되었다. GF-I-No.1은 약 40 tonf 이후에서 섬유계면을 따라서 박리가 발생한 이후 약 70 tonf에서 급작스러운 편침파괴가 발생하여 파괴시까지의



(a) CON



(b) GF-I-No.1



(c) GF-O-No.2

Fig. 4 Crack patterns of deck specimens

균열 진전양상을 정확히 고찰하지 못하였으며, 섬유앵커를 사용한 GF-I-No.2는 주철근 방향 보강재의 파단후 편침 전단파괴되었다. GF-O-No.2 시험체의 경우 CON 시험체와 마찬가지로 초기거동은 유사하게 나타났다(Fig. 4(b)). 균열의 진전은 섬유부착면을 따라서 하중이 증가함에 따라 계속해서 진전하였으며, 40 tonf 이후부터 계면을 따라서 부착이 탈락하는 것으로 나타났으며, 이후 76.16 tonf에서 이방향 휨파괴가 발생하였다.

### 3.2 하중-변위관계

보강 시험체의 하중-변위 관계는 Fig. 5와 같이 보강량에 관계없이 무보강 시험체와 유사한 거동을 하는 것을 알 수 있으며, 각 시험체가 콘크리트의 전단파괴에 의하여 취성파괴 되었기 때문에 최대 강도 이후의 변위를 측정할 수 없었다.

GF-O-No.2 시험체의 경우 섬유앵커에 의한 구조물과의 일체화에 의하여 계면박리가 발생하지 않았으며, 주철근방향 보강량(철근+보강재)과 배력철근방향 보강량(철근+보강재)이 근사적으로 동등하였기 때문에 상대적으로 응력분배가 타 시험체에 비하여 원활하여 상대적으로 높은 내하력을 나타낸 것으로 판단된다<sup>9)</sup>. Fig. 6(a)는 CON 시험체와 보강시험체의 거리에 따른 변위분포를 나타내고 있다. 거리에 따른 변위분포에서 무보강 시험체의 경우 중앙부, 바닥판의 1/4위치 및 거더의 중앙부에 따른 변위분포가 정(+) 2차 방정식곡선 형태로 나타나는 반면에 보강시험체의 경우 Fig. 7과 같이 변위분포는 부(-) 2차 방정식 곡선 분포를 나타내고 있다.

이것은 Fig. 8에서와 같이 극한상태의 항복선이 중앙부의 항복선이 성장하는 것으로 즉, 보강전 압축막의 크기에 비해 보강후 압축막의 크기가 증가하여 소성된지가 더 큰 위치에서 발생하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 9과 10에는 보강시험체의 주철근과 주철근 방향 보강재의 변형

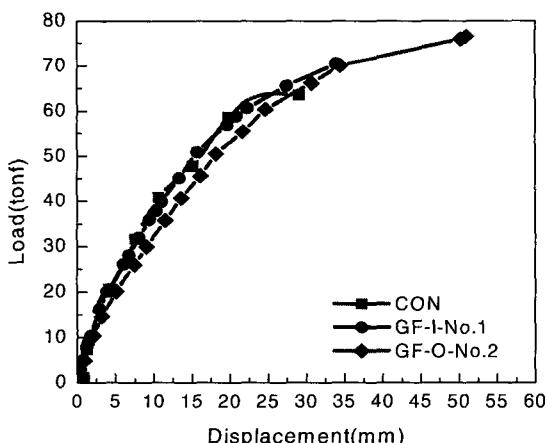
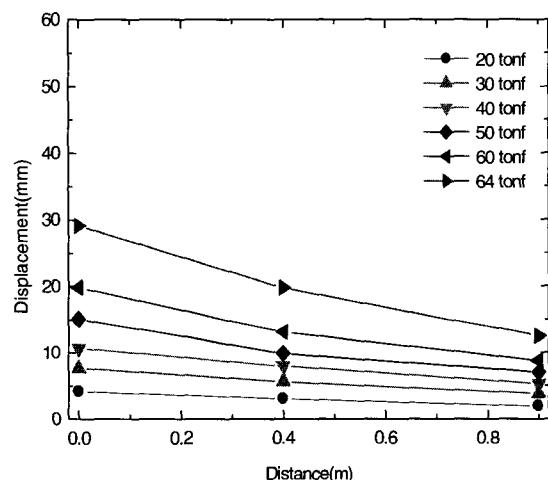


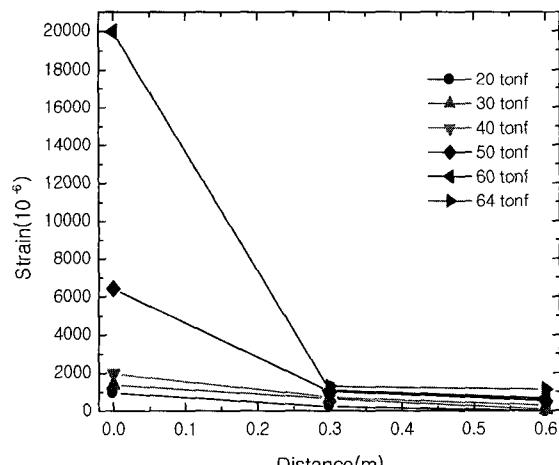
Fig. 5 Loads-displacement relationship of deck specimens

를 분포를 나타내었다. GF-O-No.1시험체의 경우 하중증가에 따라 주철근과 보강재의 변형률 증가정도가 비례하는 것으로 나타났으나, GF-I-No.1 시험체의 경우는 Fig. 9(a)와 Fig. 10(a)에 나타난 것과 같이 최대하중재하시 철근의 변형에 비하여 보강재의 변형정도가 상대적으로 크게 증가하는 것으로 나타나 주철근 방향 보강재의 응력집중 또는 보강재의 부착파괴 등으로 인하여 보강재의 미끌림과 계면박리 현상이 발생하게 되어 조기파괴된 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 GF-I-No.2시험체의 경우 더욱 크게 나타났다. GF-O-No.2시험체는 주철근의 부착파괴가 발생한 반면 보강재의 경우에는 전체적으로 파괴시까지 원활한 응력분배 및 부착상태를 유지하는 것으로 나타났다.

### 3.3 파괴하중



(a) Displacement distribution in the main rebar direction



(b) Strain distribution of the main rebar direction

Fig. 6 CON Specimen

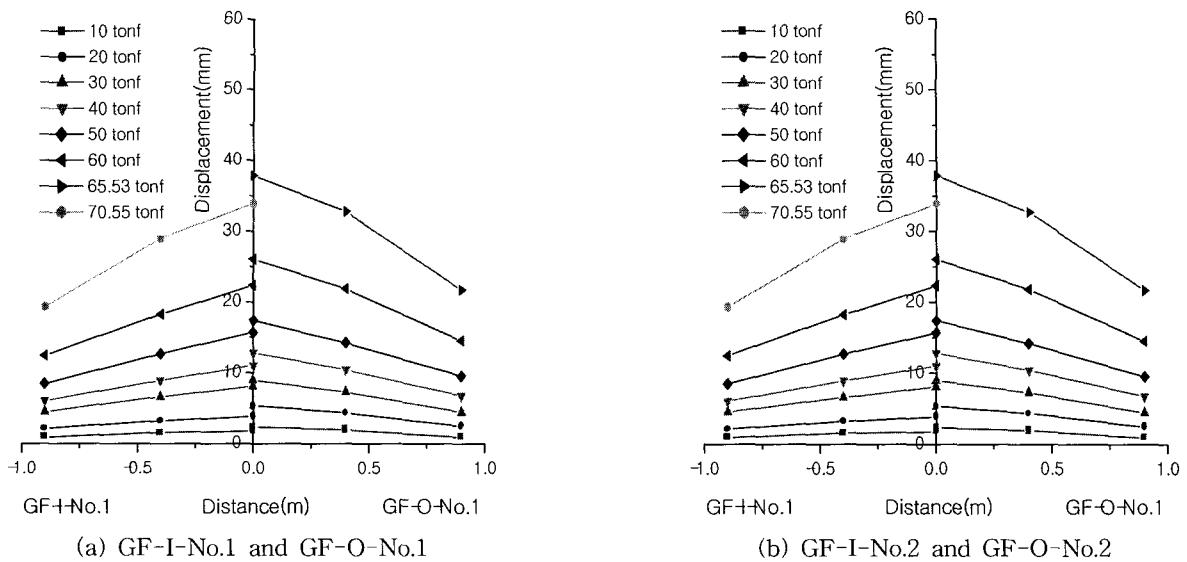


Fig. 7 Displacement distribution in the main rebar direction

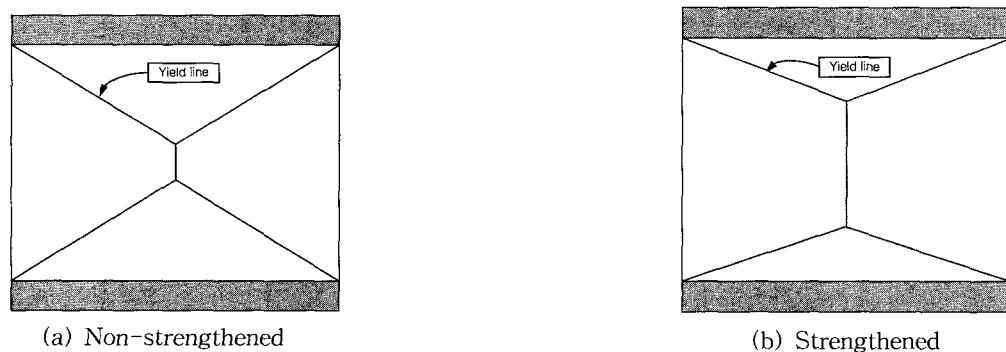


Fig. 8 Idealized yield line patterns of deck

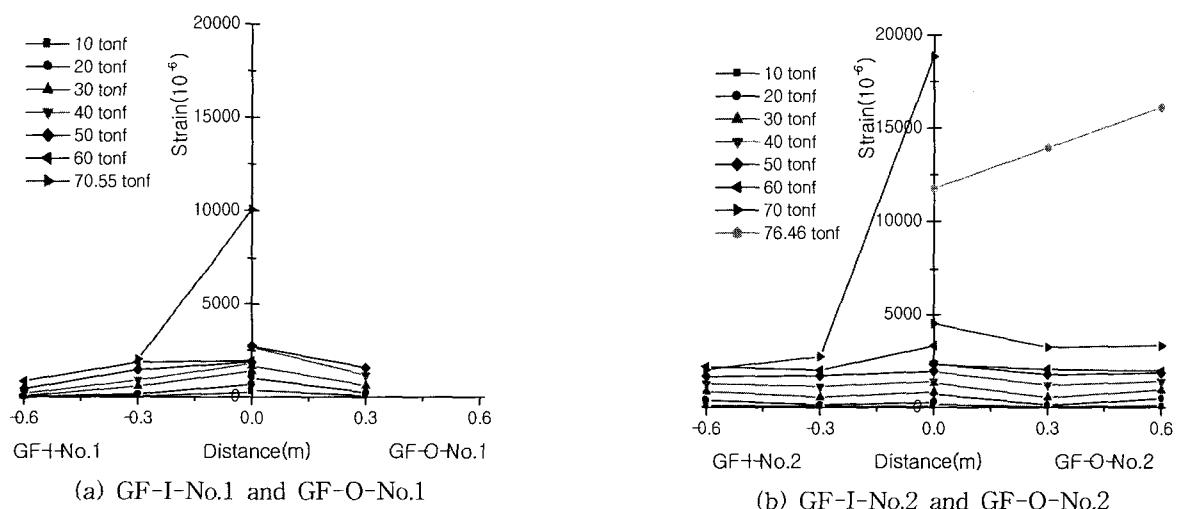
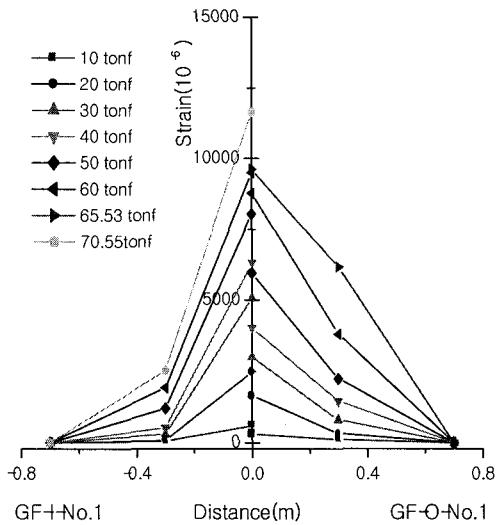
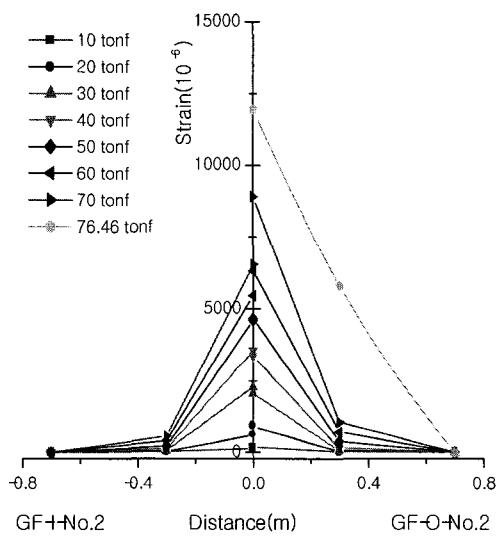


Fig. 9 Strain distribution of rebar in the main rebar direction



(a) GF-I-No.1 and GF-O-No.1



(b) GF-I-No.2 and GF-O-No.2

Fig. 10 Strain distribution of GFRP in the main rebar direction

Table 4에는 시험체의 파괴하중과 함께 항복선이론에 의한 항복하중과 편성전단이론에 의한 파괴하중을 비교하였다. 파괴하중에 근거한 보강효과를 살펴보면 GF-I-No.1 시험체는 무보강 시험체에 비해 약 10%의 보강효과를 나타내고 있다. 또한 균열이 보강재 계면을 따라 진전한 이후에 계면박리가 발생하였으며, 주철근과 배력철근 항복 이후에 편성파괴가 발생하였다. GF-O-No.2 시험체는 무보강 시험체에 비해 각각 약 20%의 보강효과를 나타내고 있으며, 유리섬유 부착면의 계면박리 이후에 이방향 거동을 하면서 흡 파괴가 발생하였다.

항복선 이론에 의한 보강후 철근 항복시 하중 및 파괴하중은 심종성과 오홍섭<sup>10)</sup>에 의하여 제시된 바닥판에 발생가능한 파괴형태에 대한 항복선 가정 후 각각식(1)과 (2)를 적용하여 계산하였다.

(1) 철근 항복시 :

$$m_{ux} = A_s f_y \left( d - 0.59 \frac{A_s f_y + b_p t_p f_{GFRP}}{f_{ck}} \right) + b_p t_p f_{GFRP} \left( d - 0.59 \frac{A_s f_y + b_p t_p f_{GFRP}}{f_{ck}} \right) \quad (1)$$

(2) 보강재 파단시 :

$$m_{ux} = A_s f_y \left( d - 0.59 \frac{A_s f_y + b_p t_p f_{u,GFRP} \cos \alpha}{f_{ck}} \right) + b_p t_p f_{u,GFRP} \cos \alpha \left( d - 0.59 \frac{A_s f_y + b_p t_p f_{u,GFRP} \cos \alpha}{f_{ck}} \right) \quad (2)$$

여기서,  $m_{ux}$ 는 단위폭당 극한 저항모멘트,  $A_s, f_y$ 는 단위폭당 철근의 면적 및 항복응력,  $b_p, t_p$ 는 단위폭당 GFRP의 폭과 두께,  $f_{GFRP}, f_{u,GFRP}$ 는 철근 항복시의 GFRP의 응력 및 GFRP의 파단강도,  $\cos \alpha$ 는 바닥판에서 발생 가능한 균열각을 나타낸다.

Table 4 Comparison with experimental ultimate load and theoretical load(unit : tonf)

Specimen	Yield load (Experiment)		Failure load (Experiment)	Yield line theory <sup>9)</sup>		Punching shear theory <sup>10)</sup>	Failure pattern
	Main	Distribution		Yield	Failure		
CON	45.0	60.0	64.0	55.0	-	61.4	Punching shear failure after rebar's yield
GF-I-No.1	61.7	66.6	70.6	65.0	87.0	72.1	Punching shear failure and interface debonding of GFRP
GF-I-No.2	60.0	-	70.1				Punching shear failure and GFRP rupture
GF-O-No.1	50.0	52.9	65.5	57.8	67.7	71.3	Interface debonding of GFRP
GF-O-No.2	66.2	75.2	76.5				Punching shear failure

보강된 바닥판의 편성전단강도는 식 (3)과 같이 심종성<sup>11)</sup>에 의하여 제안된 소성 편성전단강도 모델을 적용하였다.

$$V_{pun} = V_{cl} + V_{c2} + V_{dow} \quad (3)$$

여기서,  $V_{cl} = \pi(r_1 + r_2)s_1 f_{vl} = \pi(r_1 + r_2)s_1 f_{sp}^{2/3} \xi \mu \eta$  은 주철근 이상에서의 콘크리트의 편성전단내력<sup>12,13)</sup>

$V_{c2} = \pi(r_2 + r_3)s_2 f_{v2} = \pi(r_2 + r_3)s_2 f_{sl}^{2/3} \xi \mu \eta$ , 은 외부부착공법의 적용에 따른 주철근 이하 단면에서의 콘크리트 편성전단내력<sup>11)</sup>

$V_{dow} = \frac{1}{2} \sum_{bars} \phi_s^2 \sqrt{f_{cu} f_y (1 - \zeta^2)} \sin \theta_1$  는 바닥판의 주철근 및 배력철근의 다우얼 작용(dowel action)에 의한 내력이다.

$$r_1 = r_s + 0.1 d \cot \theta_1, \quad r_2 = r_s + d \cot \theta_1,$$

$$r_3 = r_2 + d \cot \theta_2$$

$$s_2 = \sqrt{(r_3 - r_2)^2 + (h - d)^2},$$

$\theta_1$ 은 주철근 이상에서의 균열경사각( $34^\circ$ )<sup>11,12)</sup>

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

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

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

$$f_{sp} = 0.3 f_{cu}^{2/3} \quad [\text{MPa}]$$

$$f_{sl} = 0.183 \sqrt{f_{cu}} \quad [\text{MPa}]$$

$\zeta = f_s/f_y$ 으로 철근의 항복강도  $f_y$ 에 대한  $f_s$ 의 비

$$f_s = \frac{V_{pun} \cot \theta_1}{\sum_{bars} A_s}$$

시험과 해석결과를 비교한 결과, 항복선이론에 의한 바닥판의 항복하중은 배력철근이 항복하지 않은 GF-I-No.2와 섬유앵커에 의하여 보강재의 부착성능이 향상된 GF-O-No.2를 제외하고 무보강바닥판과 보강시험체에서 5%내외의 오차를 보이는 것으로 계산되었다. 또한 보강재의 파단하중을 고려한 파괴하중은 과보강된 GF-I시험체의 경우, 실제 파괴하중보다 25%정도 과다 계산되었으며, GF-O시험체의 경우에는 보강재의 앵커 유무에 따라 차이가 큰 것으로 나타났다.

편성전단파괴 모델의 경우에는 전체적으로 실제 파괴하중과 거의 유사하게 계산되어 보강량과 보강재의 앵커 유무를 고려할 경우 소성해석에 의한 바닥판의 신뢰성있는 내하력 계산이 가능한 것으로 나타났다.

## 4. 성능향상된 교량 바닥판의 파로 거동

### 4.1 무보강 및 보강시험체의 파괴형태

무보강 교량바닥판의 파로시험결과 모든 시험체의 파로파괴 형태가 정적거동시와 유사한 것으로 나타났다. 정적성능시험에서는 하중이 증가함에 따라 초기의 일방향 거동으로 외력에 저항하던 시험체가 균열이 발달함에 따라 내력의 재분배가 진행되어 이방향으로 거동하는 것으로 관찰되었으며, 파로시험에서는 하중반복초기에는 일방향거동에 의하여 저항하다가 하중반복횟수가 증가함에 따라 균열 갯수 증가와 함께 균열폭이 증가하여 점차 이방향거동을 변화되면서 실교량 바닥판과 유사한 파괴거동을 나타내었다<sup>14)</sup>. Fig. 11에는 시험체의 파괴형상을 나타내고 있다.

CON40 시험체는 1회 재하시 바닥판 중앙부에 집중적으로 배력철근방향의 균열이 발생한 반면 주철근 방향의 균열은 1개소가 발생했다. 반복 횟수가 증가될수록 2방향 균열로 진전되면서 균열 길이와 폭은 증가되었지만 10만회 이후에는 균열 진전이 거의 없는 것으로 나타났으며, 100만회 반복하중 후, 정적하중 재하시 편성파괴되었다. 이 때의 파괴하중과 파괴각은 57.5tonf,  $12.68^\circ$ 이다.

재하하중이 파괴하중의 70%인 45tonf의 하중을 가력한 CON70는 무보강 정적 시험체와 유사한 균열 진전후 편성파괴가 발생하였으며, 이때의 파괴각은  $13.5^\circ$ 로 나타

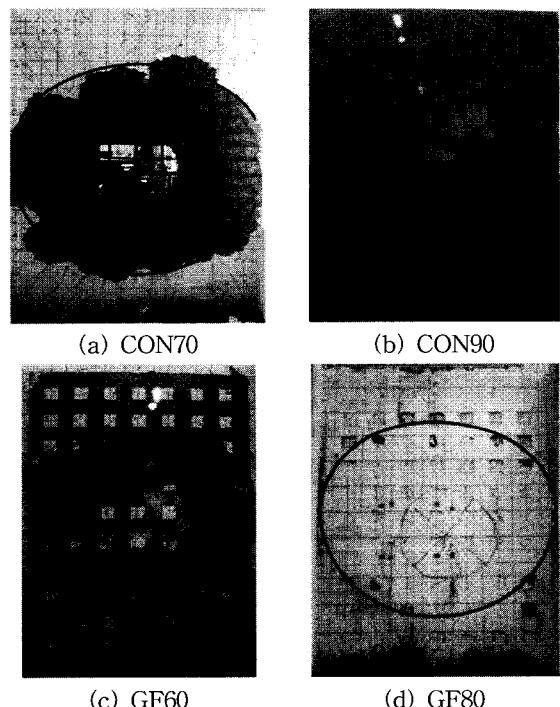


Fig. 11 Failure pattern of fatigue loaded deck specimens

났다(Fig. 11(a)). 재하하중이 파괴하중의 90 %인 CON90 시험체의 경우 반복재하 초기부터 일방향 및 이방향으로 균열이 진전되면서 10회반복이후 정적재하시 편침파괴되었고, 이때의 파괴각은 19.8°로 나타났다(Fig. 11(b)). 편침파괴는 압축막력이 작용하는 위치까지의 편침콘을 형성하면서 파괴되었다. 반복재하하중의 크기가 클수록 압축막의 크기가 재하판 하면에 집중되어 막의 크기가 작아지게 되고, 반복재하하중의 크기가 작을수록 균열 진전각의 크기가 점점 작아져서 편침콘의 크기가 증가하는 것으로 나타났다.

반복하중이 파괴하중의 40 %(28 tonf)인 GF40 시험체는 7만회 반복재하될 때까지 거의 일방향 균열이 발생하였으며, 균열갯수와 진전 정도는 미비하였다. 약 20만회부터 이방향 균열이 진전되었으나, 이후 반복재하횟수의 증가에도 시험체의 추가적인 균열 발생은 나타나지 않았다. 100만회 반복재하 이후 정적시험을 실시하였으며 이때의 파괴하중은 73.24 tonf이고 편침파괴되었다. GF40 시험체의 경우 섬유계면을 따라 약간의 균열은 발생하였으나 교량 바닥판에 직접적인 손상은 거의 없는 것으로 판단된다.

최대하중이 42 tonf으로 반복재하된 GF60 시험체는 반복횟수 10회 수행시 다수의 일방향 균열이 발생되었고 이러한 균열이 점차 이방향으로 진전되었다(Fig. 11(e)). 이 때, 15 mm 정도의 최대 변위가 발생하였으며, 중앙부의 철근이 항복하는 것으로 관찰되었다. 초기재하이후에 시험체 중앙부 하면의 균열폭은 0.1 mm이고, 10,000회 재하시의 균열폭은 0.2 mm로 측정되었다. 이후 20,000회 이상 반복재하시 거더에 사인장 균열이 발생하였고, 점차 균열의 폭이 증가하고 새로운 균열이 진전됨에 따라 중앙부에서 주철근방향 보강재의 박리가 발생하였다. 최종적으로 중앙부 및 단부의 주철근방향 보강재가 파단되고, 슬래브 중앙의 관통균열이 단부에서 가력판으로 진전되어 시험체가 파괴된 것으로 나타났다. 반복재하횟수는  $N_f = 46,611$ 였다.

최대하중이 56 tonf으로 반복재하된 GF80 시험체는 반복횟수 1회 수행시 일방향 균열과 이방향 균열이 발생하였으며, 섬유의 측면을 따라 균열이 진행되었다(Fig. 11(f)). 초기 하중 작용시의 거동이 정적시험체와 차이가 있는 것은 지점부 콘크리트의 거동 차이 또는 콘크리트의 강도차이에 기인한 것으로 판단된다. 반복횟수 10회 수행시 교량바닥판의 중앙부에 거북등 형상의 균열이 발달하였으며, 일방향 균열과 이방향 균열이 계속 진전되었고, 0.2 mm의 중앙부 균열이 섬유계면을 따라 진전되었다. 250회 이상 반복재하시 거더의 사인장 균열이 발생하였고, 점차 균열의 폭이 증가하고 주철근방향 보강재의 박리가 발생하였다. 슬래브 중앙의 관통균열이 단부에서 가력판으로 진전되어 시험체가 파괴된 것으로 나타났다. 이때 반복재하횟수는  $N_f = 1,367$ 였다.

보강재의 부분적인 탈락은 보강재에 의한 내하성능을 감소시켜 전체적인 균열폭 증가를 야기시키고 반복재하초기에 발생한 일방향 균열을 주균열로 발전시켰다. GF60과 GF80의 두 시험체 모두 주철근 및 배력철근 방향의 보강재들이 서로 박리 탈락을 억제하는 것으로 나타났으나, 배력철근방향의 보강재가 놓이지 않은 부위의 주균열에 의한 국부적인 변위증가로 인하여 주철근방향의 보강재가 파단되어 파괴되었다. 전반적으로 보강시험체 하부에 발생한 균열은 모체 콘크리트면에서 진전되다가 보강재면에서는 균열이 균열진전 방향으로 보강재를 가로질러 이어지지 않고 보강재의 끝단을 따라 섬유방향으로 진전되었다. 이때 반복재하 초기에 발생한 균열은 무보강상태의 반복하중에 의한 균열을 따라 진전되었으며, 부재의 파괴는 일방향균열이 주균열이 되고 보강재 방향으로 진전된 균열로 인해 보강재가 박리되어 국부적인 변위차가 증가하면서 주철근방향의 보강재가 파단되어 일어났다. 세 개의 시험체가 모두 편침파괴되는 양상이다.

#### 4.2 하중반복횟수에 따른 하중-변위관계

Fig. 12에는 각각의 무보강 시험체에 대한 슬래브 중심에서의 하중반복횟수에 따른 하중-변위 관계를 나타내었다. 모든 시험체에서 초기하중재하 이후에 큰 영구변위가 발생하였으나 이후 반복재하에 의한 영구변위는 비교적 작은 비율로 발생하는 것으로 나타났다.

슬래브 중심에서의 하중-변위 관계는 각 시험체가 비슷한 양상을 보였다. CON40 시험체는 초기재하에 의한 큰 폭의 영구변위를 나타냈고 반복회수가 증가함에 따라 하중-변위곡선의 기울기가 점차 감소하여 일정폭의 최대변위 및 영구 변위의 증가를 보였다. 1회째의 최대변위가 6 mm정도에서 백만회까지 처짐이 10 mm로 나타났으며 정적재하한 후 31 mm의 처짐이 생기면서 편침 파괴되었다. CON70 시험체는 초기에 CON40보다는 큰 폭의 최대변위인 11 mm를 나타냈지만 반복회수가 증가함에 따라 강성이 점차 일정하게 되면서, 일정폭의 최대변위 및 영구변위의 증가를 보였다. 5만회까지 반복재하한 결과 CON70의 최대변위는 17 mm이고 영구변위는 6 mm인 것으로 나타났다. CON90 시험체는 초기부터 큰 변위와 균열이 나면서 파괴되는 양상을 보였다. 1회째의 영구 변위는 8 mm이며 파괴때의 변위는 39 mm이다.

각각의 시험체가 재하초기에는 큰 폭의 영구변위가 나타나고 재하반복회수가 증가할수록 일정한 변위가 나타나면서 따라 하중-변위선도의 기울기가 감소하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 12(c)의 GF40 시험체는 초기 재하 이후 강성이 일정하며, 일정폭의 변위 증가률이 나타났다. 무보강 상태의 피로균열을 따라 보강 시험체의 균열이 점차 증가하는 것

으로 나타났으나, 보강재의 균열제어능력과 탄성회복능력에 의하여 보강재의 파단 전까지 반복하중에 대하여 저항하고 있음을 알 수 있다. 반복 재하 이후 정적시험을 수행한 결과, 보강재 끝단에 발생한 섬유방향 균열에 의해 보강재와 콘크리트 사이의 부분적인 탈락이 발생하고, 이로 인해 파괴상태에 도달함에 따라 영구변위 및 최대변위가 급격히 증가하고 하중-변위곡선의 기울기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 재하초기의 최대 변위는 9 mm이고, 반복재하의 최대변위는 17 mm이고 영구 변위는 10 mm이다. 정적 재하의 파괴시 변위는 48 mm로 나타났다.

Fig. 12(d)에 나타난 GF60 시험체도 초기재하 후 큰 폭의 영구변위가 발생하였다. 이는 보강재가 초기재하에 의해 모체콘크리트와 동일한 정도로 손상되었기 때문이다. 그러나 이후의 반복하중에 대한 변위곡선상에서 영구변위 및 최대변위의 증가는 비교적 작은 폭으로 일정하게 증가하였고, 10만회 이후 보강재의 박리가 발생하면서 큰 폭의 변위가 발생했다. 45만회 이후의 반복하중에 대해 GF60 시험체는 영구변위 및 최대변위가 큰 폭으로 증가하면서 파괴되었으며, 최대 변위는 31 mm로 나타났다.

GF80 시험체는 Fig. 12(e)에서 보는 것과 같이 GF60 시험체와 비슷한 양상을 보였다. 두 경우 모두 반복재하 초기에 최대변위 및 영구변위의 증가폭이 증가하다가 점차 감소하였고 대략 100회부터 일정량의 변위증가률을 보였으며, 파괴상태에 임박하여 하중-변위곡선의 기울기가 큰 폭으로 감소하고 최대변위 및 영구변위는 큰 폭으로

증가하였다. GF80 시험체의 최대변위는 23 mm로 나타난 것을 알 수 있다. 그러나, 최대변위 및 영구변위는 GF60 시험체보다 작게 나타났다.

#### 4.3 컴플라이언스변화

컴플라이언스는 “균열의 존재에 의하여 시험체 전체의 신장이 증가한다”는 개념으로 정의된다. 균열을 갖는 단위 두께의 2차원 시험체에 있어서 하중  $f$ 와 하중점의 변위  $u$  사이의 관계는 균열의 유·무에 관계없이 고체원자의 응집력에 기인하는 탄성적 관계를 갖는다<sup>[14]</sup>. 즉, 표시하는 흑크의 법칙(Hook's Law)

$$f = ku \quad (4)$$

여기서, 비례상수  $k$ 는 시험편의 용수철 상수이다. 여기서 시험편의 용수철 상수의 역수를 컴플라이언스라고 한다. 이것을  $\lambda$ 로 표시하면 식(5)와 같다.

$$\lambda = \lambda(c) = \frac{u}{f} (= \frac{1}{k}) \quad (5)$$

그런데 이 컴플라이언스는 보통의 용수철 상수와는 달리 균열을 갖는 시험체에 대하여 정의되는 양으로 균열길이의 함수로서 즉, 균열의 길이가 커질수록 시험편의 강성은 낮아져서 변형하기 쉬우므로 컴플라이언스는 증가된다.

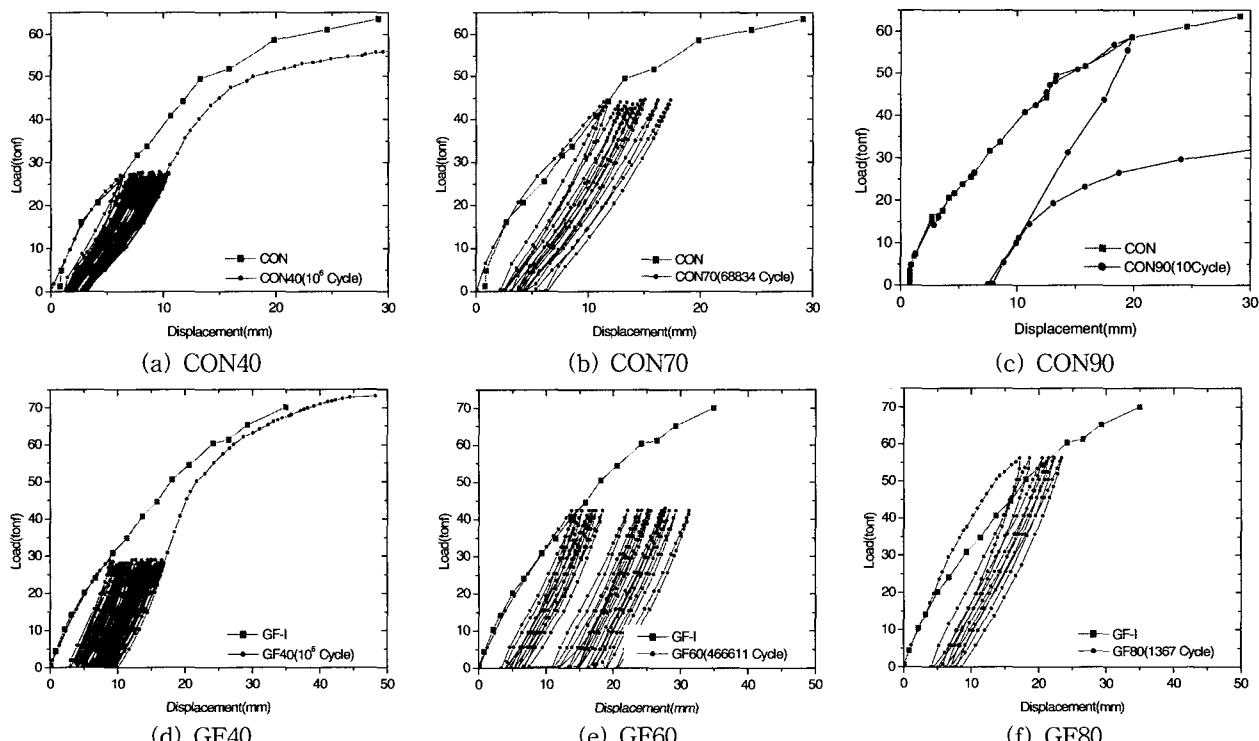


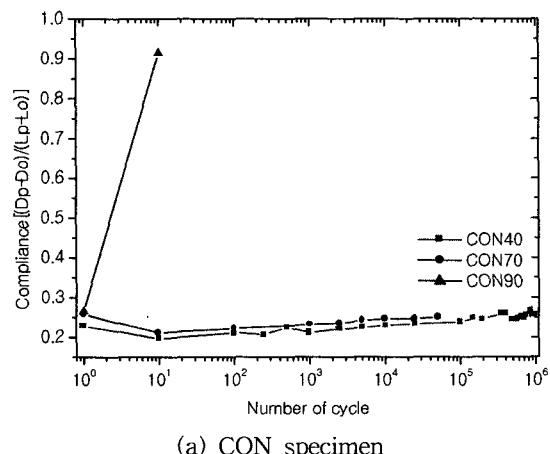
Fig. 12 Load-displacement relationship of the Cyclic loaded deck specimens

균열이 있는 시험편의 캠플라이언스  $\lambda$ 는 균열을 캠플라이언스가  $\Delta\lambda$ 인 용수철로 보고, 균열이 없는 부분의 캠플라이언스  $\lambda_0$ 를 그 용수철에 직렬로 결합시킨 결과로서 구할 수 있으며 다음과 같다.

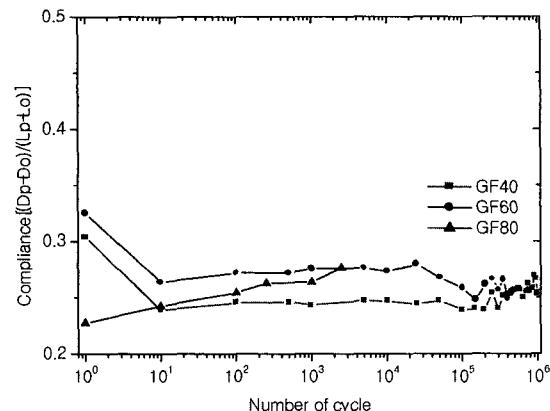
$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda \quad (6)$$

본 연구에서는 각 시험체의 손상도를 평가하기 위하여 하중-변위 선도를 이용하여 반복횟수에 따른 각 시험체의 캠플라이언스를 비교하였다. Fig. 13(a)는 각 시험체에 대한 반복횟수별 캠플라이언스 변화를 나타낸 것이다. CON40과 CON70은 대략 10회부터 캠플라이언스의 변화가 감소하였다가 이후로 증가하는 것을 알 수 있다. 반복 하중에 의해 손상이 계속해서 진행되는 것을 알 수 있으며, CON90의 경우는 큰 반복하중에 의해 초기손상 즉, 강성저하가 매우 크게 발생하였기 때문이다.

Fig. 13(b)는 보강시험체의 캠플라이언스변화를 나타내고 있으며, GF60과 GF40 시험체는 무보강 시험체와 유사하게 초기의 캠플라이언스변화량이 초기에 감소하다가 초기의 일정량의 증가량을 가지다가 파괴에 도달함과 동시에



(a) CON specimen



(b) Strengthened specimen

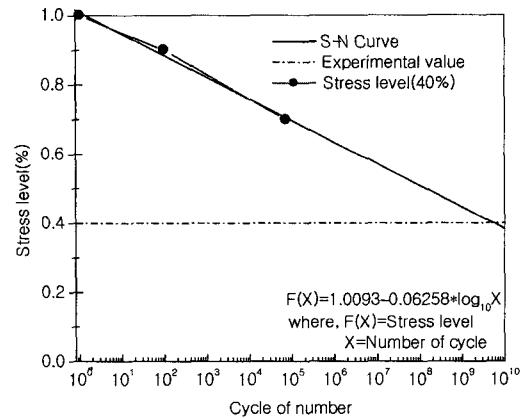
Fig. 13 Compliance due to fatigue loading

에 갑작스런 증가량이 나타났다. 피로파괴된 시험체들의 파괴직전 캠플라이언스가 급격히 변화한 것은 균열이 보강재의 끝단을 따라 섬유방향으로 진전됨에 따라 국부적인 탈락에 의해 균열제어 능력이 상실되었음을 알 수 있다. 반면, GF80 시험체는 반복 재하 초기부터 캠플라이언스가 증가하고 있다. 무보강 시험체에 비해 보강시험체의 캠플라이언스 변화량의 기울기 즉 균열성장률은 보강 시험체의 경우 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

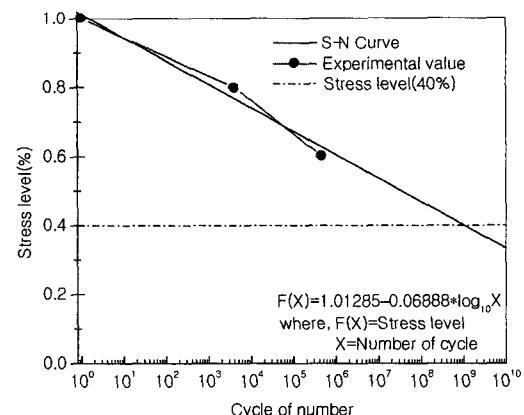
#### 4.4 S-N 관계

Fig. 14(a)와 (b)는 무보강 시험체와 보강시험체의 응력수준과 반복횟수에 따른 개략적인 S-N 관계를 나타내고 있으며, Table 5에는 각 응력수준별 최종반복재하횟수를 나타내었다.

콘크리트 구조물에서의 피로한계는 각국의 기준에 따라 약 100만회~200만회일 경우를 나타내고 있으며, 본 연구에서는 100만회를 피로한계로 가정하였으며, Miner이론에 의한 S-N 관계로 부터의 피로한계는 무보강 시험체와 보강시험체의 경우 각각 63.38 %와 60.49 %에 해당하는 응



(a) CON specimen



(b) Strengthened specimen

Fig. 14 S-N relationship

Tale 5 Test results( $N_f$ ) for deck specimens

Specimen	Loads (tonf)	$N_f$	Specimen	Loads (tonf)	$N_f$
CON40	25	$1.0 \times 10^6$	GF40	28	$1.0 \times 10^6$
CON70	45	68,834	GF60	42	466,611
CON90	58	10	GF80	56	1,367

력수준에서 피로한계값을 가진다. 이에 해당하는 하중은 각각 40.56 tonf와 42.34 tonf에 해당한다. 사용하중 상태인 파괴하중의 40 %에 해당하는 하중인 무보강 시험체와 보강시험체의 하중 각각 26 tonf과 28 tonf에서의 수명은 S-N 관계로부터 도출할 수 있으며 각각의 수명은 약  $5.45 \times 10^9$ 회와  $0.79 \times 10^9$ 회일 때 파괴되는 것으로 판단되었다.

그러나 실제 실험에서는 100만회 피로하중을 가한 후에 무보강 시험체의 경우 정적시험 즉, 64 tonf에서 파괴된 시험체에 비해 일부 손상을 받은 것으로 나타났으나, 보강 시험체의 경우는 전혀 손상이 나타나지 않았는 것으로 나타났다. 즉, 무보강 시험체의 경우는 Haibach 법칙에 나타나는 바와 같이 응력수준이 한계값 이하여도 손상이 일정 수준으로 발생하며, 무보강 시험체는 그 기울기가 보강 시험체에 비해 큰 것을 알 수 있다<sup>15)</sup>.

## 5. 결 론

본 연구에서는 성능향상된 교량 바닥판의 보강효과를 검증하기 위하여 교량 바닥판의 정적 및 피로시험을 실시하였으며, 각각 정적 파괴하중에 대한 응력수준별 피로시험을 실시하였다. 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 바닥판의 편침파괴는 과다한 철근량과 바닥판의 높이 부족 등으로 인하여 균열과 균열사이에 발생된 콘크리트 스트립이 주철근 항복 이후 각각 분리되면서 콘크리트의 전단내력이 상실되었기 때문인 것으로 판단된다.

2) 항복선 이론과 소성편침전단강도 해석에 의한 이론적인 내하력이 실제 바닥판 시험체의 파괴하중을 예측할 수 있는 것으로 나타났으며, 보강설계시 바닥판의 정확한 내하력 향상정도를 이론적으로 산정할 수 있을 것이다.

3) 피로 하중을 받는 성능향상된 교량 바닥판은 초기에 섬유부착면을 따라 균열이 발생하며 점차 진전된 이후에 섬유계면이 탈락하면서 다소 큰 변위를 발생시킨다. 이것은 손상도 곡선상에서 초기에 급속한 손상이 발생된 이후에 일정한 손상도의 기울기를 가지는 것과 동일한 상태이며 이후 파괴까지 급속한 영구변위가 발생하면서 파괴된다. 성능향상된 교량 바닥판은 섬유계면이 탈락한 이후에 손상도의 마지막 단계에 도달하였다.

4) 보강 시험체가 무보강 시험체에 비해 컴플라이언스

변화가 적은 것으로 나타났으며, 보강시험체의 컴플라이언스 곡선상에서 갑작스런 변화는 섬유보강재의 탈락으로 인한 균열의 신장이 급속히 증가하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, 노후교량조사 및 보수공법개발(최종보고서), 1988. 4.
2. 望月秀次, “床版の損傷事例と補修方法,” 全國建設研究センター, 1995, pp.10~26.
3. Max S. and Eugen B., “Fatigue of Existing Reinforced Concrete Bridge Deck Slabs,” *Engineering Structures*, Vol. 20, Issue 11, Nov. 1998, pp.991~998.
4. 오홍섭, “탄소섬유워터로 성능개선된 교량 바닥판의 보강설계기법,” 한양대학교 박사학위논문, 2001.
5. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 2000.
6. Fang, I. K., Worley, J. A., Burns N. H., and Klingner, R. E., “Behavior of Isotropic R/C Bridge Decks on Steel Girders,” *Journal of the Structural Engineering*, Vol. 116, No. 3, ASCE, Mar. 1990, pp.659~678.
7. Perdikaris, P. C. and Beom, S. “RC Bridge Deck under Pulsating and Moving Load,” *Journal of the Structural Division*, Vol. 114, No. 3, ASCE, 1988, pp.591~607.
8. Hawkins, N. M., “Fatigue Design Consideration for Reinforcement in Concrete Bridge Decks,” *ACI Journal*, Vol. 73, ACI, 1976, pp.104~115.
9. Batchlor, B., Brain, E., Hewitt, P., Csagoly, P. and Holowka, M., “Investigation of the Ultimate Strength of Deck Slabs of Composite Steel/Concrete Bridges,” *Transportation Research Record*, No. 664, Transportation Research Board, 1978, pp.162~170.
10. 심종성, 오홍섭, “항복선 이론을 적용한 성능향상된 철근콘크리트 교량상판의 해석적 연구,” 대한토목학회 학술발표회논문집, 2000년 10월, pp.67~70.
11. 심종성, 오홍섭, 유재명, “외부부착방법으로 성능향상된 교량 바닥판의 편침전단강도,” 대한토목학회 논문집, 제21권 6-A호, 2001년 11월, pp.873~880.
12. Menetery, Ph. “Analytical Computation of the Punching Strength of Reinforced Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp.503~511.
13. Menetery, Ph., Walther, R., Zimmermann, Th. “Simulation of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures,” *Journal of Structural*

- Engineering*, ASCE, 1997, Vol. 123, No. 5,  
pp.652~659.
14. Schlaflí, M. and Bruhwiler, E., "Fatigue of  
Existing Reinforced Concrete Bridge Deck Slabs,"
- Engineering Structures*, Vol. 20, No. 11,  
pp.991~998, 1998.
15. 장동일, "구조공학에서의 파괴와 피로," 동명사,  
1999. 10.

## 요 약

교량바닥판의 손상이 구조물의 내구성, 안전성 및 기능에 영향을 미치기 때문에 손상된 바닥판의 성능향상을 위하여 섬유보강재를 사용한 구조물보강 사례가 증가하고 있다. 그러나 최근의 연구들이 구조물의 정적거동에 국한되어 있는 상이며, 피로거동에 대한 연구는 극히 제한적으로 수행되고 있다.

본연구에서는 쉬트형 유리섬유보강재로 보강된 11개의 바닥판시험체에 대하여 정적 및 피로실험을 실시하여 구조거동을 실험적으로 검증하고자 하였다. 정적실험변수는 보강방향에 따른 보강량을 변수로 하였으며, 정적시험결과로부터 나타난 무보강시험체와 보강시험체의 최대하중에 기초하여 피로시험시의 응력수준을 선정하였다. 시험결과 보강된 바닥판의 경우 균열진전에 대한 저항성이 증진되는 것으로 나타났으며, 응력분배 효과 또한 뛰어난 것으로 나타났다. 이와 함께 피로시험결과 캠플라이언스 변화정도 역시 무보강바닥판에 비하여 효과적으로 감소하는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 보강바닥판, 시험적 연구, 유리섬유강화 폴리머