



# GFRP 보강근으로 보강된 바닥판의 보강비에 따른 정적 및 피로성능 평가

유영준<sup>1,2)</sup> · 박영환<sup>1)</sup> · 최지훈<sup>2)</sup> · 김장호<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 인프라구조연구실 <sup>2)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부

## Evaluation of Static and Fatigue Performances of Decks Reinforced with GFRP Rebar for Reinforcement Ratio

Young-Jun You,<sup>1,2)</sup> Young-Hwan Park,<sup>1)</sup> Ji-Hun Choi,<sup>2)</sup> and Jang-Ho Jay Kim<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 411-712, Korea

<sup>2)</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**ABSTRACT** The corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete bridge decks significantly affects the degradation of the capacity. Due to the advantageous characteristics such as high tensile strength and non-corrosive property, fiber reinforced polymer (FRP) has been gathering much interest from designers and engineers for possible usage as a alternative reinforcement for a steel reinforcing bar. However, its application has not been widespread, because there data for short- and long-term performance data of FRP reinforced concrete members are insufficient. In this paper, seven full-scale decks with dimensions of 4000 × 3000 × 240 mm were prepared and tested to failure in the laboratory. The test parameter was the bottom reinforcement ratio in transverse direction. The decks were subjected to various levels of concentrated cyclic load with a contact area of 577×231 mm to simulate the vehicle loading of DB-24 truck wheel loads acting on the center span of the deck. It was observed that the glass FRP (GFRP) reinforced deck on a restraint girder is strongly effected to the level of the applied load rather than the bottom reinforcement ratio. The study results showed that the maximum load less than 58% of the maximum static load can be applied to the deck to resist a fatigue load of 2 million cycles. The fatigue life of the GFRP decks from this study showed the lower and higher fatigue performance than that of ordinary steel and CFRP rebar reinforced concrete deck. respectively.

**Keywords** : GFRP, reinforcement, pultrusion, concrete deck, fatigue capacity

### 1. 서 론

철근 콘크리트 부재는 구조적으로나 재료적으로 많은 장점을 가지고 있지만 철근이 부식에 취약하다는 단점을 가지고 있고 이것은 전체 구조물의 성능저하에 중요한 요인으로 작용한다. 잘 알려져 있듯이 극심한 온도 편차와 염화칼슘 사용으로 철근의 부식이 촉진되고 이는 결국 구조물의 수명단축으로 이어진다.

이러한 부식 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방법 중 하나는 비부식성 재료를 사용하여 철근을 대체할 수 있는 보강근을 제작하는 것이고 그러한 재료 중 하나로 섬유복합재료(fiber reinforced polymer, 이하 FRP)가 주목 받고 있다. FRP는 비강도가 크고 무게가 가벼우면서 특

히 비부식성 재료이기 때문에 이를 이용하여 철근을 대체할 수 있는 보강근이나 긴장재를 개발하려는 연구가 여러 나라에서 이루어지고 있으며, 몇몇 제품은 상용화 되어 실제 현장에 사용되고 있다.<sup>1)</sup>

FRP 보강 콘크리트 부재에 대한 실험과 연구는 세계 여러 나라에서 많이 이루어지고 있으나 이에 대한 설계 기준을 제정하여 사용하고 있는 나라는 미국, 캐나다, 유럽, 일본 정도로 많지 않다.<sup>2-4)</sup> FRP 보강 콘크리트 부재에 대한 활용 실적이 부족한 이유 중 한 가지는 보강근이 표준화되지 않았기 때문이다. FRP 보강근은 각 개발자의 의도에 따라 다양한 재료와 성분비, 형태 등으로 제작되기 때문에 이를 활용한 FRP 보강 콘크리트 부재의 거동 특성 평가는 제한적일 수 있다.<sup>5)</sup> 또 다른 이유로는 부재 거동 전반에 걸친 성능평가 결과가 부족하기 때문으로 FRP 보강 콘크리트 부재의 성능평가는 주로 휨거동과 단기거동 측면에 집중되어 이루어져 왔고 장기거동에 대한 실험 데이터는 많지 않은 실정이다.<sup>6,7)</sup> 또한 탄성계수와 횡방향 강도가 상대적으로 작기 때문에 동일 보강비를

\*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr

Received March 12, 2014, Revised May 19, 2014,

Accepted May 29, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

가진 철근 보강 부재에 비해 처짐이 크고 전단강도가 작은 것도 한 이유이다.<sup>7)</sup>

거더로 지지된 바닥판에는 지지 거더에 의해 가해지는 측면 구속작용으로 압축 멤브레인(membrane) 힘이 발생하게 되어 바닥판의 휨강성은 비약적으로 증대된다. 이로 인해 바닥판은 돔(dome)과 같은 거동을 하게 되어 최종적으로는 편칭에 의해 파괴된다.<sup>8-10)</sup> 따라서 거더가 구속된 경우에는 휨파괴가 지배적이지 않기 때문에 철근보다 GFRP 보강근을 사용하는 것이 유지관리 측면에서 유리할 수 있다.

Matsui 등<sup>11)</sup>은 180 mm 두께의 철근 콘크리트 바닥판과 175 mm 두께의 무철근 바닥판에 대하여 운하중을 적용하여 피로실험을 수행하였으며 재하 하중 수준과 반복 횟수 사이의 관계를 제안하였다. Klowak 등<sup>12)</sup>은 폭 3 m, 길이 9 m의 실크기 바닥판을 세 개의 구역으로 나누어 철근 보강, CFRP 및 GFRP 보강근만으로 보강하여 정적과 피로성능 실험을 실시하였다. 실험 결과 사용하중 수준에서는 1백만 회의 하중을 반복적으로 가하여도 바닥판에는 심각한 손상이 발생하지 않았으며, 사용하중의 2.4배 정도의 하중으로 반복재하하는 경우 피로파괴가 나타났다고 보고하였다. 이 결과를 바탕으로 피로수명 예측식을 제안하였다. El-Ragaby 등<sup>13)</sup>은 GFRP 보강근이 사용된 무철근 바닥판에 대하여 일정 횟수마다 하중을 다르게 적용한 피로실험을 수행하여 누적된 손상과 바닥판 수명과의 관계를 관찰하였다. 실험 결과로부터 재하된 하중의 수준과 반복 재하 횟수 사이의 관계식을 도출하였으며, 다른 연구자들에 의해 수행된 다른 제원의 바닥판 수명도 적절히 예측할 수 있다고 하였다.

이 연구에서는 국내에서 개발된 GFRP 보강근<sup>14)</sup>을 사용하여 보강된 바닥판의 장기성능 중 하나인 피로성능을 평가하고자 하였다. 보강비를 변수로 하여 길이 4000 mm, 폭이 3000 mm, 높이 240 mm인 실제 크기의 교량 바닥판 7개를 제작하였고 다양한 크기의 반복하중에 대한 성능을 평가하였다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 GFRP 보강근

바닥판 실험체 제작에 사용된 GFRP 보강근은 국내에서 개발된 것으로 Fig. 1과 같은 형상을 가지고 있다. 보강근의 재료로는 E-glass와 vinyl ester가 사용되었으며, 브레이딩과 인발성형이 조합된 방법으로 제작되어 주섬유의 인발과 돌기 형성시 강한 장력의 도입으로 우수한 성능을 나타낸다. Table 1에는 개발된 보강근의 성능을 나타내었다. 이 실험대상 바닥판 실험체에는 D19 보강근이 사용되었다.

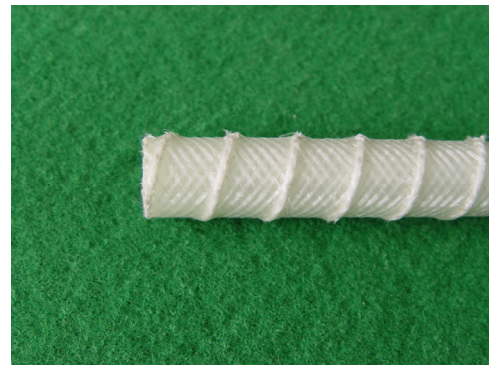


Fig. 1 GFRP reinforcing bar

Table 1 Properties of GFRP rebar<sup>14)</sup>

Property	D13	D16	D19
Average max. tensile strength $f_{fu,ave}$ , (MPa)	1130	1066	1030
Guaranteed tensile strength $f_{fu}^* = f_{fu,ave} - 3\sigma$ , (MPa)	1059	988	981
Design tensile strength $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ , [MPa], ( $C_E=0.8$ )	847	691	687
Nominal elastic modulus (GPa)	49.3	47.8	46.7
Average bond strength (MPa)	19.6 <sup>(1)</sup>	10.8 <sup>(2)</sup>	-

Note) <sup>(1)</sup>ACI 440.3R-04, <sup>(2)</sup>CSA S806-02

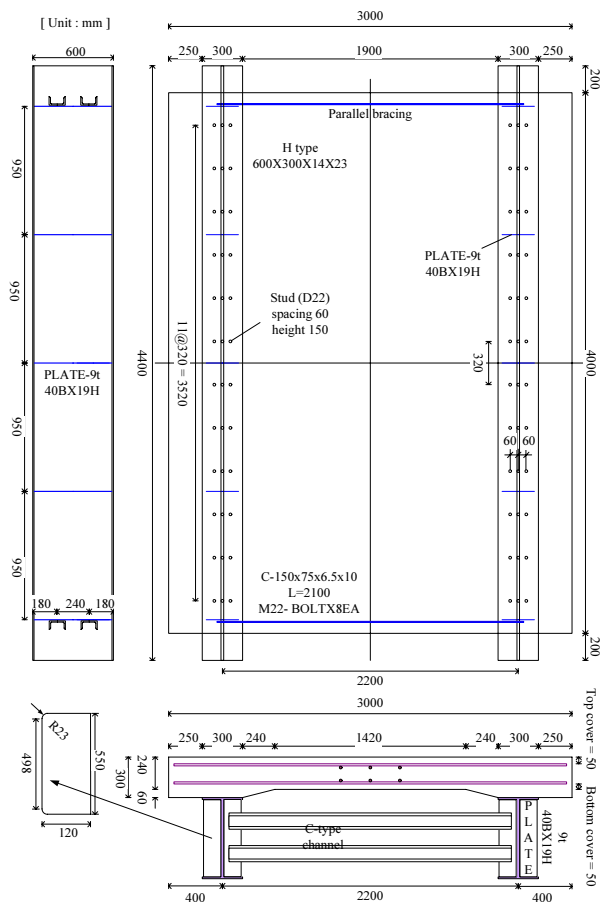


Fig. 2 Geometry details of decks (unit: mm)

## 2.2 바닥판 설계 및 제작

바닥판의 크기는 폭과 길이, 두께가 각각 3000 mm(순지간 2200 mm), 4000 mm, 240 mm이며, 600×300×14×23 규격의 H형강을 이용하여 거더를 구성하였다. 거더의 복부는 9 mm 두께의 강판으로 보강하였으며 C형강으로 거더의 종방향 양단을 보강하였다. 바닥판의 제원을 Fig. 2에 나타내었다.

국내에는 FRP 보강 콘크리트 구조물에 대한 설계기준이 없기 때문에 도로교설계기준<sup>15)</sup>을 준용하여 바닥판을 설계하였고 해외 기준에 대해 검토하였다.

도로교설계기준<sup>15)</sup>에서는 거더가 강재이고 바닥판의 지간 방향이 차량 진행방향에 직각인 경우에 철근 콘크리트 바닥판의 최소 두께는 220 mm와 30L+130 mm 중 큰 값을 사용하도록 되어 있다. 현장타설 콘크리트 바닥판인 경우 경험적으로 지간 방향의 하부 철근에 대해서는 0.4%, 지간 방향의 상부 철근과 지간 직각 방향의 상하부 철근에 대해서는 0.3%를 최소 보강비로 규정하고 있다. 기상조건이 양호한 곳에서의 콘크리트 바닥판의 콘크리트 덮개는 30 mm 이상으로 규정하고 있다.

Canadian Highway Bridge Design Code<sup>16,17)</sup>에서는 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물에 대한 규정을 포함하고 있다. FRP 보강 콘크리트 바닥판의 최소 보강비에 대해 2000년 규정에서는 모든 방향에 대해 0.3%로 권장하였으나 2006년 규정에서는 경험적으로 지간 직각방향 하부에는 단위길이당  $500d_s/E_{FRP}$  이상을, 나머지 부분에 대해서는 0.35% 이상의 보강비를 사용하도록 권장하고 있다. 설계된 실험대상 바닥판은 위 규정들을 모두 만족하고 있다.

실험변수는 보강비이며 GFRP 보강근으로 보강된 바닥판 GD 1은 기준이 되는 실험체이다. GD 2와 GD 3 바닥판은 GD 1에 비해 하부의 중횡보강비를 증가시킨 경우이다. 모든 바닥판의 상부 보강근비는 종방향과 횡방향 모두 0.436%로 고정시켰고, 상하부 콘크리트 덮개는 모두 50 mm가 사용되었다. GD 1과 GD 3는 각각 3개씩, GD 2는 1개의 바닥판을 제작하였다. 바닥판별 보강비를 Table 2에 나타내었다.

모든 바닥판은 보통 중량의 레미콘을 사용하여 타설되었으며, 100×200 mm의 실린더형 시편을 이용하여 시험

**Table 2** Bottom reinforcements ratio of the decks

Name	Rebar type	Reinforcement ratio	
		Transverse	Longitudinal
GD 1	GFRP	D16@ 200 mm (0.546%)	D16@ 250 mm (0.436%)
GD 2	GFRP	D16@ 125 mm (0.873%)	D16@ 160 mm (0.764%)
GD 3	GFRP	D16@ 100 mm (1.091%)	D16@ 140 mm (0.873%)

한 콘크리트의 평균 압축강도는 36 MPa이었다.

## 2.3 실험 방법

모든 바닥판에 대해 도로교설계기준<sup>15)</sup>에 규정된 DB-24 등급의 후륜 하중이 집중 재하되는 것으로 실험하였다. 이를 위해 후륜의 접지면적을 환산하여 폭 231 mm, 길이 577 mm, 두께 70 mm인 강판과 20 mm 두께의 고무판을 바닥판 중앙에 설치하였다.

가력점과 지점 주변의 변위를 관찰하기 위하여 변위계를 바닥판 하면에 설치하였으며 균열 계측을 위해 Ω형 게이지를 이용하였다.

바닥판을 제위치에 위치시키고 각종 계측기의 설치와 초기값 설정을 마친 후에 정적하중을 가하여 바닥판 하면에 균열을 유발시켰다. 초기 균열은 사용하중 수준에서 발생하였으며 이를 표시한 후에 하중을 제거하고 균열 경로를 따라 Ω형 균열게이지를 부착하였다. 이후 각 바닥판별로 계획된 반복하중을 재하하였다.

차륜에 의한 집중하중을 모사하기 위하여 다양한 하중 수준에 대해 일정한 진폭으로 바닥판에 하중을 재하하였다. 포장체 하중과 반복재하시 충격하중을 방지하기 위하여 하중의 최소값은 15 kN으로 설정하였다. 도로교설계기준<sup>21)</sup>에서 1 등급 하중으로 규정된 차량의 후륜 최대 하중은 96 kN이다. 이 값에 충격 계수 1.3을 고려하면 사용하중 124.8 kN을 얻을 수 있다. 반복재하 하중의 크기는 사용하중의 3.5, 4.5, 5.0배로 설정하였다. 반복재하 계획을 Table 3에 나타내었다.

바닥판의 정적성능을 살펴보기 위하여 GD 1과 GD 3 바닥판은 0.5 mm/min의 속도와 변위제어로 정적실험을 먼저 수행하였다.

피로성능 관찰을 위한 반복하중은 1000 kN 용량의 동적 액츄에이터(actuator)를 이용하여 3 Hz의 속도로 재하하였으며, 정해진 횟수마다 정적실험을 수행하여 변화량을 관찰하였다. 2백만 회 가력 후에 파괴가 발생하지 않았을 경우에는 3000 kN 용량의 액츄에이터를 이용하여 파괴될 때까지 정적하중을 재하하였다. Fig. 3에는 실험 전경을 나타내었다.

**Table 3** Loading scheme

Deck	Applied load for fatigue (kN)			Max. number of cycles
	$P_{min}$	$P$	$P/P_{ser}$	
GD 1-1	-	-	-	0 (static test)
GD 1-2	15	560	449%	$2 \times 10^6$
GD 1-3	15	630	505%	$2 \times 10^6$
GD 2	15	560	449%	$2 \times 10^6$
GD 3-1	-	-	-	0 (static test)
GD 3-2	15	432	346%	$3 \times 10^6$
GD 3-3	15	560	449%	$2 \times 10^6$

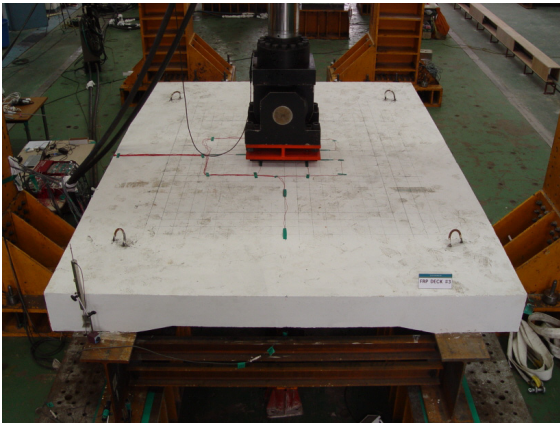


Fig. 3 Photograph of test set-up

### 3. 실험 결과

#### 3.1 정적 강도

GFRP 보강근으로 보강된 바닥판에 하중을 반복적으로 재하 후의 성능을 비교하기 위하여 먼저 GD 1-1 바닥판과 이에 비해 하부 종횡방향 보강비를 2배 증가시킨 GD 3-1 실험체에 대해 정적성능 실험을 실시하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

GD 1-1과 GD 3-1의 정적 최대하중은 각각 959 kN, 1067 kN으로 나타났다. GD 3-1은 GD 1-1에 비해 하부 종횡방향 보강비를 증가시킨 것으로 보강비가 2배 증가하더라도 최대하중은 약 11% 정도만 증가하는 결과가 나타났다. You 등<sup>18)</sup>은 하부 횡방향 보강비가 0.546%인 철근과 GFRP 보강근으로 보강된 바닥판과 보강비가 1.091%인 GFRP 보강 바닥판에 대한 정적 실험을 실시하였다. 이 실험에서 GFRP 보강근의 보강비를 두 배 증가시킨 경우 최대하중은 약 15% 증가한 것으로 나타나 이 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

#### 3.2 피로 강도

GD 2와 GD 3-2 바닥판은 하부 종횡방향 보강비를 GD 1-2에 비해 60%, 100% 증가시킨 것으로서 560 kN의 하중으로 2백만 회를 반복재하한 후의 잔류강도는 각각 957 kN, 970 kN을 나타내어 GD 1-2의 943 kN과 큰 차이를 나타내지 않았다.

이의 결과를 사용하중의 약 3.5배 하중(432 kN, 최대하중의 40%) 또는 약 5배 하중(630 kN, 최대하중의 66%)으로 가력한 바닥판 GD 3-2, GD 1-3의 결과와 비교해 보면, 작용하중 크기가 상대적으로 낮은 경우에는 반복재하를 2백만회 또는 3백만 회 수행하여도 피로파괴는 발생하지 않았고 최대하중도 거의 유사한 것으로 나타났다. 그러나 상대적으로 큰 하중을 재하한 경우에는 약 1백만 회에서 피로파괴가 발생하였다. 따라서 거더가 횡방향으로 구속되어 있는 바닥판에 있어서 피로성능은 보강비보

Table 4 Maximum strength and residual displacement

Deck	P (kN)	After 2 million cycles		Remark
		Max strength (kN)	Residual displacement (mm)	
GD 1-1	-	959	-	Static
GD 1-2	560	943	6.1	-
GD 1-3	630	-	-	Failed after $1.2 \times 10^6$
GD 2	560	957	7.8	-
GD 3-1	-	1,067	-	Static
GD 3-2	432	960	-	After $3.0 \times 10^6$
GD 3-3	560	970	7.1	-

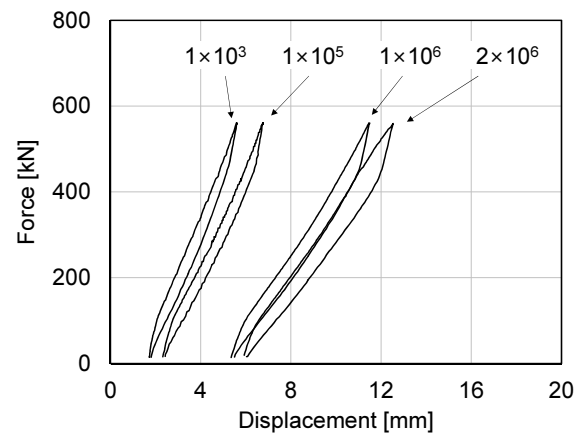


Fig. 4 Force-displacement response (GD 1-2 deck)

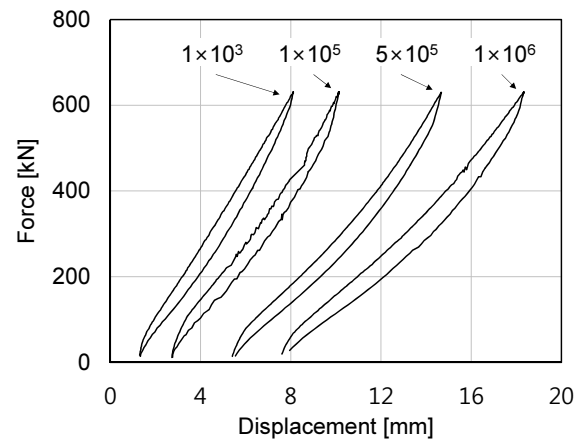


Fig. 5 Force-displacement response (GD 1-3 deck)

다는 작용하중의 크기에 민감한 것으로 판단된다.

#### 3.3 하중-변위 거동

Fig. 4~8에는 계획된 반복하중을 재하한 후 정적하중을 가했을 때 바닥판 중앙 하면의 처짐과 하중과의 관계를 나타내었다.

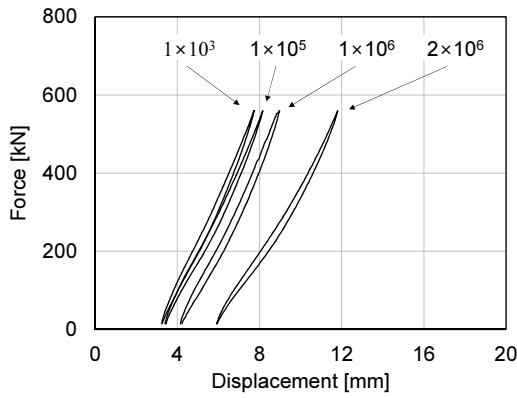


Fig. 6 Force-displacement response (GD 2 deck)

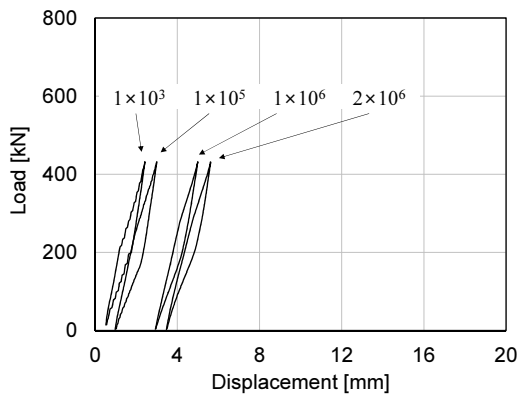


Fig. 7 Force-displacement response (GD 3-2 deck)

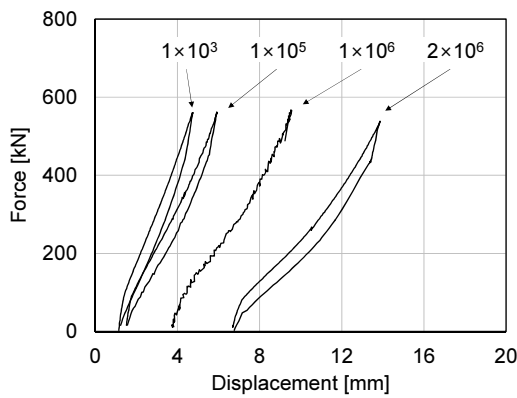


Fig. 8 Force-displacement response (GD 3-3 deck)

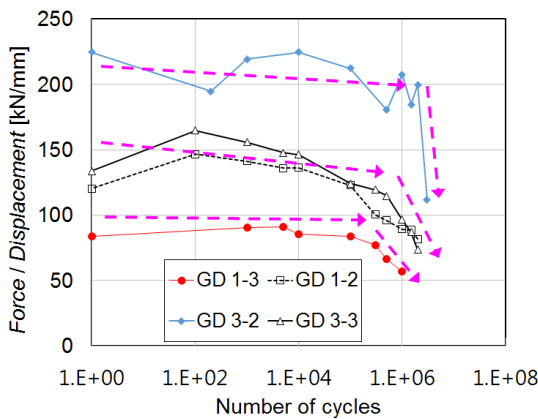


Fig. 9 Change of stiffness for cyclic load

대부분의 바닥판에서 비록 영구변형이 발생하였으나 1백만 회까지 하중을 반복재하한 후에도 강성은 거의 변하지 않는 것으로 관찰되었다. GD 1-3 실험체만 1236943번의 하중이 재하된 뒤에 파괴되었는데 Fig. 5에서 보듯이 파괴되기 직전에 강성이 급격히 낮아지는 것이 관찰되었다.

강성 변화를 정량적으로 분석하기 위해 Fig. 9에 GD 1-3, GD 1-2, GD 3-3 바닥판의 재하회수에 따른 강성(=하중/변위)의 변화를 나타내었다.

서술한 바와 같이 피로파괴가 발생한 GD 1-3 바닥판의 경우 파괴직전에 강성이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 현상으로부터 비록 피로파괴가 발생하지는 않았으나 GD 1-2, GD 3-3 바닥판의 강성이 저하가 급격히 관찰되고 있어 곧 파괴될 가능성이 있는 것을 유추할 수 있다.

재하하중의 크기가 상대적으로 작은 GD 3-2 바닥판의 경우에는 2백만 회 재하 후에는 강성변화가 거의 없지만 3백만 회 재하 후에는 강성이 급격히 낮아져 이 역시 곧 파괴될 가능성이 있다.

### 3.4 피로수명

이 연구에서는 GFRP 보강근으로 보강된 교량 바닥판의 반복하중에 의한 피로수명을 관찰하고자 세 가지 하중 수준에 대해 실험을 실시하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

정적 최대하중의 약 40% 하중을 적용한 바닥판 GD 3-2는 하중을 3백만 회 이상 반복재하하여도 파괴가 발생하지 않았고, 하중을 560 kN으로 높여 가력한 GD 1-2와 GD 3-3(정적성능의 58%와 52%) 바닥판에서도 2백만 회 가력 시까지 파괴가 발생하지 않았다. 오직 하중 크기를 정적성능의 66%로 적용한 GD 1-3 바닥판만 1,236,943번 재하된 순간에 파괴되었다.

많은 연구자들이 철근 또는 FRP 보강근으로 보강된 바닥판의 피로수명을 예측하고자 하였다. 몇몇 연구자들이 제안한 바닥판의 피로수명 예측식을 아래에 나타내었다.

Youn and Chang<sup>8)</sup>:

$$\log\left(\frac{P}{P_s}\right) = -0.066 \log(N) + \log 1.4461 \quad (1)$$

Matsui 등<sup>11)</sup>:

$$\log\left(\frac{P}{P_s}\right) = -0.07835 \log(N) + \log 1.52 \quad (2)$$

Klowak 등<sup>12)</sup>:

$$N = 10 \text{Exp}\left(5 \sqrt{\frac{1}{P/P_s} - 1}\right) \quad (3)$$

El-Ragaby 등<sup>13)</sup>:

$$\frac{P}{P_s} = 0.0034 (\log N)^2 - 0.1187 (\log N) + 1.0752 \quad (4)$$

이 실험에서는 하나의 바닥판에서만 피로파괴가 관찰되었다. 다른 바닥판에서는 파괴가 발생하지 않았으나 서술한 바와 같이 2백만 회 또는 3백만 회 가력 후 강성이 급격히 감소하고 있어서 곧 파괴될 가능성이 있기 때문에 2백만 회 또는 3백만 회 가력 후 실험체가 파괴된다고 가정하여 연구자들이 제안한 예측식 비교하여 Fig. 10에 나타내었다.

그림에서 Youn and Chang<sup>8)</sup>과 Matsui 등<sup>11)</sup>의 모델은 철근 콘크리트 바닥판의 실험으로부터 도출된 결과임을 감안하면 이 연구에서 사용된 철근과 유사한 돌기를 가진 GFRP 보강근으로 보강된 바닥판의 경우 Klowak 등<sup>13)</sup>과 El-Ragaby 등<sup>13)</sup>의 예측식보다 높은 하중 수준을 보이고 있어 개발된 GFRP 보강근을 사용한 바닥판은 상대적으로 우수한 피로성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 바닥판에 최대하중을 1회 가했을 때 파괴가 발생( $P/P_s=1$ )하는 것을 고려하여 보강비가 동일한 실험

체별로 회귀분석을 실시한 그래프이다. 그림에서 GD 3 실험체 그룹은 GD 1 실험체 그룹에 비해 보강비가 두 배 증가된 실험체로서 최대하중 대비 재하하중 크기 비율이 같은 경우 GD 1에 비해 상대적으로 짧은 피로수명을 나타내고 있다. 이는 보강비 증가로 강성이 커져 바닥판이 상대적으로 취성적이 되기 때문으로 판단된다.

계측된 값들에 대해 회귀선을 도출하면 이 연구 결과에 의한 수명 예측식은 식 (5)와 같고 다른 모델들에 비해 El-Ragaby 등<sup>13)</sup>의 모델과 상대적으로 근사한 경향을 나타내고 있다.

$$\frac{P}{P_s} = -0.032 \text{Ln}(N) + 1.0068 \quad (5)$$

그러나 식 (5)는 GD 1-3 외의 실험체가 파괴에 임박했다는 가정으로부터 도출되었고, 일반적인 피로수명 예측식에는 보강비의 영향이 고려되어 있지 않으나 이 실험 결과로부터 보강비가 피로수명에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 판단되기 때문에 더 많은 변수와 실험체에 대한 실험 결과로부터의 보정이 필요하다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 국내에서 개발된 GFRP 보강근으로 보강된 콘크리트 바닥판의 설계를 위한 기초자료를 마련하고자 이에 대한 피로성능을 평가하였다. 실험을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 거더가 횡구속된 바닥판의 경우 바닥판 하부의 중형 보강비 증가에 의한 정적 최대하중의 증가는 미미하다.
- 2) 사용하중의 4.5배에 해당하는 하중을 2백 만회 반복 재하한 후에도 보강비 증가에 따른 최대하중 증가 경향은 나타나지 않았다. 따라서 정적 실험과 반복 재하 실험으로부터 설계규정을 준수하여 제작된 GFRP 보강 바닥판의 최대하중은 보강근비에는 민감하지 않다.
- 3) GFRP 보강 바닥판이 2백만 회 이상의 반복재하에 저항하기 위해서는 재하되는 집중하중의 크기가 최대하중의 58% 수준 이하이어야 한다.
- 4) 설계기준에 따라 제작된 GFRP 보강 바닥판의 경우 보강비를 증가시키는 것은 피로성능에 긍정적인 영향을 미치지 않는다.

#### 기호 설명

- $d_s$ : 인장연단에서 하부 보강근 중심까지 거리(mm)
- $f_{fu}$ : FRP 보강근의 설계 인장강도(MPa)
- $f_{fu,ave}$ : FRP 보강근의 평균 최대 인장강도(MPa)
- $f_{fu}^*$ : FRP 보강근의 보장 인장강도(MPa)

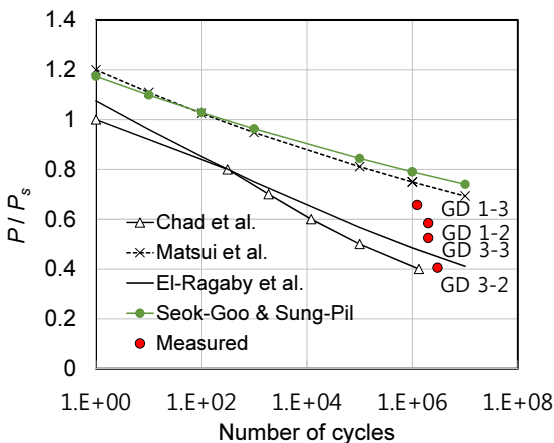


Fig. 10 Comparison of fatigue life prediction models

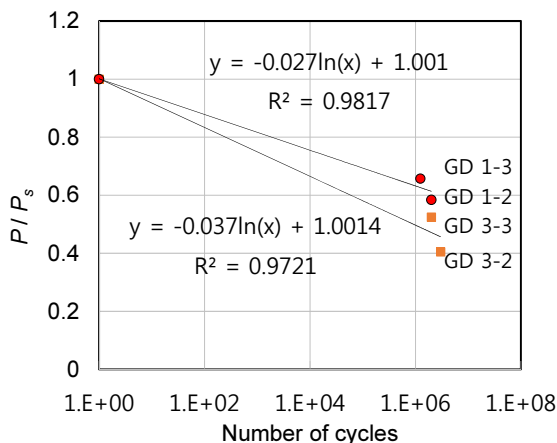


Fig. 11 Fatigue life prediction on reinforcement ratio

$C_E$ : 환경 감소 계수  
 $E_{FRP}$ : FRP의 평균 탄성계수(GPa)  
 $L$ : 바닥판의 지간(m)  
 $P$ : 반복재하시 가해지는 최대 하중(kN)  
 $P_s$ : 정적 최대 하중(kN)  
 $P_{ser}$ : 사용하중(kN)  
 $\sigma$ : 표준편차

## References

1. Benmokrane, B., El-Salakawy, E., El-Ragaby, A., and Lackey, T., "Designing and testing of concrete bridge decks reinforced with glass FRP bars," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 2, 2006, pp. 217-229. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:2\(217\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:2(217)))
2. ACI 440.1R-06, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, Farmington Hills (MI, USA), American Concrete Institute, 2006.
3. CSA S806-02, *Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers*, Toronto (Ont., Canada), Canadian Standards Association, 2002.
4. Japan Society of Civil Engineers, *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Concrete Engineering Series 23, Tokyo, Japan, 1997.
5. Sim, J. S., Oh, H. S., Ju, M. K., and Lim, J. H., "New Suggestion of Effective Moment of Inertia for Beams Reinforced with the Deformed GFRP Rebar," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, 2008, p. 185.
6. Seo, D. W., Han, B. S., and Shin, S. W., "Behaviour of One-Way Concrete Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 6, 2007, pp. 763-771.
7. El-Ragaby, A. El-Salakawy, E., and Benmokrane, B., "Fatigue analysis of concrete bridge deck slabs reinforced with E-glass/vinyl ester FRP reinforcing bars," *Composites Part B: engineering*, 38, 2007, p. 703. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.07.012>)
8. Youn, S. G. and Chang, S. P., "Behavior of Composite Bridge Decks Subjected to Static and Fatigue Loading," *Structural Journal*, ACI Technical paper, Title No. 95-S23, 1998, pp. 249-258. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/543>)
9. John, C. G., Jubum, K., James, H. W., Ned, H. B., and Richard, E. K., "Punching-Shear Behavior of Bridge Decks under Fatigue Loading," *Structural Journal*, ACI, Title No. 99-S27, 2002, p. 257. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/11909>)
10. Susan, E. T., Barry, R., David, J. C., and Jim, K., "Serviceability of Bridge Deck Slabs with Arching Action", *Structural Journal*, ACI, Title no.104-S05, 2007, p.39. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/18431>)
11. Matsui, S., Tokai, D., Higashiyama, H., and Mizukoshi, M., "Fatigue Durability of Fiber Reinforced Concrete Decks Under Running Wheel Load," *Proceedings 3rd International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, Ed. N. Banthia, Vancouver, Canada, 2001, pp. 982-991.
12. Klowak, C., Memon, A., and Mufti, A., "Static and fatigue investigation of second generation steel-free bridge decks," *Cement & Concrete Composites*, ScienceDirect, Elsevier, Vol. 28, No. 10, 2006, pp. 890-897. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.019>)
13. El-Ragaby, A., El-Salakawy, E., and Benmokrane, B., "Fatigue Life Evaluation of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with Glass FRP Composite Bars," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 11, No. 3, 2007, pp. 258-268. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:3\(258\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:3(258)))
14. KICT, *Design and construction technology for concrete structures using advanced composite materials (in Korean)*, Final report submitted to the Korea Research Council of Public Science and Technology, Korea Institute of Construction Technology, 2008.
15. Ministry of Construction & Transportation, *Korean highway bridge design code*, 2005.
16. CAN/CSA-S6-00, *Canadian Highway Bridge Design Code*, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2000, 346 pp.
17. CAN/CSA-S6-06, *Canadian Highway Bridge Design Code*, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2006, p. 714.
18. You, Y. J., Park, Y. H., Park, J. S., and Kim, H. Y., "Experimental study on bridge decks reinforced with GFRP rebars," *4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, Zurich, Switzerland, 22-24 July, 2008, pp. 1-6.

**요 약** 철근의 부식은 철근콘크리트 교량 바닥판의 성능 저하에 큰 요인으로 작용한다. FRP는 비부식성 재료이기 때문에 이를 활용하여 보강근을 개발하려는 노력이 이루어지고 있다. 여러 종류의 FRP 보강근이 개발되었으나 아직 활용 실적은 많지 않은 상황이다. 그 이유로는 FRP 보강 콘크리트 구조물에 대한 단/장기 검증 데이터가 부족하기 때문이다. 이 연구에서는 GFRP 보강 바닥판에 대한 피로성능을 관찰하기 위해서 길이 4000 mm, 폭이 3000 mm, 높이 240 mm인 실제 크기의 교량 바닥판을 도로 교설계기준을 준용하여 제작한 후 실험을 실시하였다. 하부 보강비를 변수로 설정하였으며 DB-24 하중이 바닥판 중앙에 집중 작용하는 것으로 실험을 실시하였다. 사용하중의 3.5, 4.5, 5.0배에 해당하는 다양한 하중을 2백 만회 이상 반복 재하하여 GFRP 보강 바닥판의 피로성능을 관찰하였다. 실험 결과 거더가 횡구속된 GFRP 보강 바닥판의 최대성능은 보강근비에는 민감하지 않았고, 피로성능은 보강비보다는 적용하중의 크기에 민감하며, 바닥판이 200만회 이상 반복재하에 저항하기 위해서는 재하되는 집중하중의 크기는 최대하중의 58% 수준 이하이어야 하며, 이 연구의 실험 대상 GFRP 보강 바닥판의 피로수명은 철근 콘크리트 바닥판의 수명 예측값보다는 다소 낮은 값을 나타내었고 FRP 보강 콘크리트 바닥판의 기존 예측값보다는 높은 값을 나타내었다.

**핵심용어** : FRP, 보강근, 인발성형, 바닥판, 피로