복합재료 바닥판의 피로성능 평가에 관한 연구

A Study on the Fatigue Performance Evaluation of Deck Plate Composite Material

김두환* · 박준석** · 金聖弼***

Kim, Doo-Hwan · Park, Jun-Seok · Kim, Seong-Pil

Abstract

Recently the compound material has been interested in using the structural material as the bridge member assembly. It is the lighter material against existing construction material and has excellent durability and economy. The existing floor of bridge has its short period to repair and replace compared to other parts of the bridge with the pavement and the shoe. These deteriorations of usage and safety by aging and corrosion are needed frequent maintenance. The use of compound material as a structural member suggests solve these problems. It is determined that if the bridge member is to reflect maximum the strong points of compound new material to solve the expected problems, the compound material can improve remarkably the life and durability of bridge floor plate bringing the least maintenance and be possible to use the structural material to reduce its life cycle cost in the long term. So this thesis evaluates the static and the fatigue performance for whether there are fiber lamination direction of FRP floor plate, the compound material.

Key words : Composite materials, Fiber lamination direction, Fatigue performance, Deck Plate

요 지

최근 복합재료가 교량부재 제작에 사용되는 구조재료로서 관심을 받고 있다. 이는 기존의 건설재료에 비해 경량재료이면서 내구성과 경제성이 우수하기 때문이다. 기존의 사용 중인 교량의 바닥판은 교면포장 및 신축이음장치와 함께 교량의 다른 부재에 비하여 보수 빈도와 교체주기가 짧다. 이런 교량의 노후화와 바닥판의 부식으로 인한 사용성 및 안전성의 저하는 잦은 유지, 보수 관리를 필요로 하고 있다. 건설에서 구조재료로서의 복합재료 사용은 이러한 문제점에 대한 해결방향을 제시하고 있다. 교량부재의 구조재료로서 복합신소재의 장점을 최대한 반영하고 예상되는 문제점을 해결할 수 있다면 복합재료는 교량바닥판의 내구성과 수명을 획기적으로 개선하고 최소의 유지관리를 필요하게 되므로 장기적으로는 생애주기비용을 감소시킬 수 있는 구조재료로서 활용 가능하다고 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 복합재료인 FRP바닥판 부재의 섬유 적층방향에 따른 정적 및 피로성능을 평가하였다.

핵심용어 : 복합재료, 섬유적층방향, 피로성능, 바닥판

1. 서 론

복합재료는 비강성, 비강도가 기존의 콘크리트나 강재에 비해 상대적으로 높고 비부식성, 경량성, 전기절연성 등 재료적 장점과 방향성을 이용하여 우수한 역학적 성질을 얻을 수 있으며, 다양한 형태로 만들 수 있는 뛰어난 성형성을 가지고 있다. 복합재료 기술은 강화섬유, 매트릭스 재료의 기술에서부터 설계제작에 이르기까지 여러 학문분야가 복합적으로 필요하며 각 세부분야에 대한 연구를 위하여 학제간의 상호지식이 필요한 전형적인 복합적 기술분야이다.

본 연구에서는 FRP바닥판의 섬유방향의 피로거동을 분석하고 S-N Curve를 도출하여 FRP바닥판 재료에 대한 실험적 자료를 축적하고, 축적된 자료를 건설기술에 응용하는데 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험내용 및 범위

본 시험에서는 FRP바닥판 시험체의 정적 · 피로시험을 통하여 인장력에 의한 응력 상태와 하중-변형률, 하중-변위값의

*교신저자. 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수(Tel: +82-2-970-6504, Fax: +82-000-0000, E-mail: kdh6504@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author: Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**서울과학기술대학교 구조공학과 석사

Master, Department of Structure Engineering, Seoul National University of Science and Technology

***中國 東北大學 資源与土木工程學院 博士過程

Ph.D Candidate, College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, China

데이터를 획득, 추적하고 이로부터 FRP바닥판의 안전성을 평가 실시함으로써 장기 계획수립 및 공용기간 중 안전성을 확보하여 유지관리에 효율성을 높이기 위함을 목적으로 시험을 실시하였다.

2.2 시험체상세

2.2.1 시험체 치수

Table 1. Type and Section Characteristics of Fiber Direction Test Specimen

형상 Type	시험 변수	치수 Dimension (mm)			물림길이 (mm)	단면적 (mm ²)
		W	B			
섬유방향 정적시험체	TL-1	390	29.85	14.50	60	432.83
	TL-2	390	30.00	14.65	60	439.50
	TL-3	390	29.75	14.15	60	420.96
섬유방향 피로시험체	FL-1	390	30.00	14.65	60	439.50
	FL-2	390	29.65	14.45	60	428.44
	FL-3	390	29.80	14.35	60	427.63
	FL-4	390	29.65	14.50	60	429.93
	FL-5	390	29.30	14.45	60	423.39
	FL-6	390	29.75	14.15	60	420.96
	FL-7	390	29.60	14.20	60	420.32
	FL-8	390	29.45	14.60	60	429.97
	FL-9	390	29.90	15.00	60	448.50
	FL-10	390	29.90	14.65	60	438.04
	FL-11	390	29.80	14.20	60	423.16
	FL-12	390	29.60	14.20	60	420.32
	FL-13	390	29.45	14.60	60	429.97
	FL-14	390	29.90	15.00	60	448.50
	FL-15	390	29.70	14.50	60	430.65
	FL-16	390	29.90	14.65	60	438.04
	FL-17	390	29.75	14.00	60	416.50
	FL-18	390	29.90	15.00	60	448.50
	FL-19	390	29.60	14.55	60	430.68

2.2.2 시험체 형상

Fig. 1. Shape of fiber direction test specimen

2.3 시험방법

2.3.1 정적시험

정적시험은 ASTM-D3039에서 추천하는 방법으로 진행 되었으며, 시험체의 파괴시 까지의 변형률을 측정하기 위해 시

험체의 정중앙에 변형률게이지를 부착하였다. 변형률게이지 및 변형률측정기는 일본 TML사의 Strain Gauge(Type: FLA-5-11-1L)와 Portable Data Logger인 TDS-302가 사용되었다.

시험 data의 정확성을 확보하기 위하여 버니어캘리퍼스를 이용하여 최소단위 0.05 mm까지 측정하였으며, 폭 및 두께를 5군데 이상 측정하여 평균값을내어 응력계산에 이용하였다.

시험체를 무는 Grip의 압력, 시험체가 물리는 면적등은 수 회의 예비실험에 의해 결정되었으며, 모든 시험체에 동일하게 적용하였다. 시험체가 정착된후에 Instron사의 모델 8502(용량: 25 kN)를 이용하여, 인장하중을 재하하였다. 하중의 재하 방식은 변위제어이며, 재하속도는 1 mm/min으로 인장하중을 가하였고, 동시에 변형률 측정기를 이용하여 1 Hz의 속도로 인장변형률을 측정하였다. 그림 2는 본 연구에 사용된 Instron 8502 시험기의 형상이며, 그림 3은 인장시험 전 형상과 시험 후의 파괴형상을 나타내었다.

Fig. 2. Test equipment of static and fatigue tests

Fig. 3. Before and after shape of FRP composite materials in static test

2.3.2 피로시험

피로시험은 ASTM-D3479에서 추천하는 복합재료의 인장-인장 피로시험에 준하여 실험하였다.

피로시험에서의 적용응력은 정적시험결과에 따르며, 주파수(Frequency) 13 Hz로 각각 일정하게 시험을 실시하였다. 하중의 재하방식은 Haver Sine wave를 이용한 하중제어방식으로 하였다. 또한, 시험체에 압축이 걸리지 않도록 응력비(Stress ratio) 0.1의 인장-인장 피로시험을 실시하였다. 피로시험에 적용된 응력수위는 0.7~0.3범위이며, 본 연구에서 재료의 피로한계(Fatigue Limit)는 건설에서의 무한수명인 200만

Fig. 4. Before and after shape of FRP composite materials in fatigue test

회로 보았다.

그림 4는 복합재료 피로시험의 시험전 형상과 시험후의 파괴형상을 나타내고 있다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 정적시험

3.1.1 시험체 정적시험 결과 및 분석

섬유방향 시험체 정적시험 측정결과는 표 2와 같다.

섬유방향 시험체의 최대하중은 107.27 kN로 측정되었고 시험체 TL-1,2,3의 평균 파괴하중은 101.87 kN로 측정되었다.

Table 2. Static test results of fiber direction test Specimen

No	면적 (mm ²)	파단하중 (kN)	인장응력 (MPa)	최대변형률 (10 ⁻⁶)
TL-1	463.83	107.27	231.27	13502
TL-2	439.50	92.59	210.67	17385
TL-3	420.96	105.75	251.22	14615

Fig. 5. Stress-strain and load-elongation relationship of fiber direction test specimen

시험체의 파단은 상,하 Grib 148~128 mm에서 파단이 발생하였고 섬유방향 시험체의 정적시험 결과 최대인장응력의 경우 시험체 TL-3이 251.22 MPa로 가장 큰 값을 나타내었다. 최대신장량의 경우 시험체 TL-1이 7.16 mm로 가장 큰 값을 가지는 것으로 측정되었다. 또한 섬유방향 시험체의 인장응력의 평균치는 234.9 MPa이고 최대변형률의 경우 정적 시험체 TL-2에서 17385×10^{-6} 으로 측정되었고, 최소변형률은 시험체 TL-1에서 13502×10^{-6} 으로 측정되었다.

섬유방향 시험체는 평균인장응력에 약 10%내에 해당하는 인장응력을 보였으며, 변형률 역시 안정적인 모습을 보였다. 그림 5에서는 하중-신장량 및 응력-변형률 관계를 나타내었다.

3.2 피로시험

3.2.1 섬유방향 시험체 피로시험 결과

섬유방향 피로시험 결과 표 3과 같이 응력범위 88.15 Mpa에서 시험체 FL-17이 8.16 mm의 최대 신장량이 발생하였고, 응력범위 69.97 Mpa에서 시험체 FL-9이 0.14 mm의 최소 신장량이 발생하였다. 시험체 FL-7~11 경우 모두 최소 1,500,000

Table 3. Fatigue test results of fiber direction test specimen

No	응력 범위 (MPa)	최대 신장량 (mm)	최대 변형률 (10 ⁻⁶)	Cycles
FL-1	146.20	3.05	6502	920
FL-2	128.55	4.36	7312	6,974
FL-3	107.32	2.76	8402	51,338
FL-4	96.08	3.78	6302	74,238
FL-5	86.72	3.45	6502	375,883
FL-6	76.18	2.77	8402	546,730
FL-7	75.70	0.55	4853	1,626,736 이상
FL-8	72.50	0.85	5168	1,844,186 이상
FL-9	69.97	0.14	5066	1,591,079 이상
FL-10	69.34	1.44	5107	1,731,000 이상
FL-11	65.51	0.38	5161	1,504,762 이상
FL-12	152.87	4.92	7063	1,727
FL-13	128.08	4.29	6257	8,110
FL-14	102.33	2.21	8212	97,014
FL-15	95.91	3.96	6424	291,586
FL-16	89.06	6.24	9319	816,828
FL-17	88.15	8.16	9193	1,164,400
FL-18	71.63	5.97	8816	1,595,038
FL-19	74.47	0.41	2629	2,212,849 이상

Fig. 6. Life-elongation relationship of FL-1,2

Fig. 7. Life-elongation relationship of FL-3,4

Fig. 12. Life-elongation relationship of FL-13, 14

Fig. 8. Life-elongation relationship of FL-5,6

Fig. 13. Life-elongation relationship of FL-15, 16

Fig. 9. Life-elongation relationship of FL-7,8

Fig. 14. Life-elongation relationship of FL-17, 18

Fig. 10. Life-elongation relationship of FL-9,10

Fig. 15. Life-elongation relationship of FL-19

Fig. 11. Life-elongation relationship of FL-11, 12

사이클 이상에서도 미세 균열조차 발생하지 않았다.

시험체 FL-8의 경우 2,212,849회의 반복횟수까지 미세균열조차 발생하지 않은 것으로 보아, 220만회 이상의 피로수명을 보유하고 있는 것으로 판단된다.

그림 6~15는 섬유방향 피로시험체의 수명-신장량 관계를 나타내었다.

3.2.3 피로시험 결과 분석

섬유방향 피로시험체의 응력범위와 피로수명은 표 4와 같으며, 파괴형상은 종방향의 형상을 나타냈다. 시험체 FL-1~6

Table 4. Stress range and fatigue life of the fiber direction fatigue test specimen

NO.	단면적 (mm)	하중범위(tonf)			응력범위(MPa)			Cycle
		Max	Min	Amp	Max	Min	Amp	
FL-1	439.5	7.28	0.728	6.552	162.44	16.24	146.20	920
FL-2	428.44	6.24	0.624	5.616	142.83	14.28	128.55	6,974
FL-3	427.63	5.2	0.52	4.68	119.25	11.92	107.32	51,338
FL-4	429.93	4.68	0.468	4.212	106.75	10.68	96.08	74,238
FL-5	423.39	4.16	0.416	3.744	96.36	9.64	86.72	375,883
FL-6	420.96	3.64	0.364	3.27	84.79	8.47	76.18	546,730
FL-7	420.32	3.12	0.312	2.808	72.79	7.28	65.51	1,626,736(이상)
FL-8	429.97	3.38	0.338	3.04	77.09	7.71	69.34	1,844,186(이상)
FL-9	448.5	3.56	0.356	3.2	77.84	7.78	69.97	1,591,079(이상)
FL-10	438.04	3.598	0.3598	3.24	80.56	8.06	72.50	1,731,000(이상)
FL-11	423.16	3.63	0.363	3.266	84.12	8.41	75.70	1,504,762(이상)
FL-12	420.32	7.28	0.728	6.552	169.85	16.99	152.87	1,727
FL-13	429.97	6.24	0.624	5.616	142.32	14.23	128.08	8,110
FL-14	448.5	5.2	0.52	4.68	113.73	11.37	102.33	97,014
FL-15	430.65	4.68	0.468	4.212	106.57	10.66	95.91	291,586
FL-16	438.04	4.42	0.442	3.978	98.95	9.90	89.06	816,828
FL-17	416.5	4.16	0.416	3.744	97.95	9.79	88.15	1,164,400
FL-18	448.5	3.64	0.364	3.27	79.59	7.96	71.63	1,595,038
FL-19	430.68	3.6338	0.3634	3.2704	82.74	8.27	74.47	2,212,849(이상)

에서는 응력범위의 감소에 따라 피로수명은 순조롭게 증가하는 경향을 보였으나 응력범위 76.18 Mpa에서 54만회 정도로 200만회를 기준으로 할때 피로한계가 상당히 낮아지는 현상이 나타났다. 다시 200만회의 피로수명을 구하기 위하여 응력범위를 낮춰 65.61 Mpa~75.70 Mpa로 시험을 실시한 결과 시험체 FL-7~11번에서는 모두 최소 1,500,000회 이상의 반복하중에도 미세 균열조차 발생하지 않았으며, 변위의 측정값 또한 0.14 mm~1.44 mm로서 낮은 값을 가지는 것으로 보아 200회 이상의 피로 수명을 가지는 것으로 판단되었다. 시험체 FL-12~19번에서는 응력범위에 따라 피로수명이 급속히 증가되는 현상이 나타났다.

피로하중을 복합재료가 받을 경우에 복합재료의 초기 손상은, 하중 방향에 수직이거나 큰 각도의 섬유가 섬유의 함량이 과다한 영역에서 기지로부터 분리되는 박리 현상으로부터

시작된다고 알려져 있다. 이러한 박리 현상은 섬유와 기지 사이에 발생하는 응력집중 및 변형률의 집중 때문에 발생한다. 발생한 크랙은 섬유와 기지 사이의 계면을 따라서 전진한다.

섬유방향 시험체의 경우 인장응력의 36%에서 200만회를 만족하는 피로한도를 보였다 즉, 40%의 인장응력 안에서 200만회를 만족하는 피로 한도를 갖게 되었다.

섬유방향에 경우 길이방향의 균열과 층간분리가 일어나면, 독립적인 여러 개의 층으로 나뉘어진 복합재료가 하중을 지탱하는 것과 같은 효과를 주어, 높은 강성을 가지나, 직각 방향의 경우 섬유와 기지 사이의 계면파괴, 기지의 파괴 및 기공의 성장 혹은 층간분리 등의 현상이 강하게 지배하기 때문인 것으로 사료된다. 각 적층형태에 대한 응력 집중부의 피로한도는 섬유 방향의 경우 평활 시험체에 비해 10%정도 낮은 피로한도를 가졌다.

4. 구조해석

4.1 플라이파손하중 결정

시험체의 최초 균열은 플라이에서 일어난다. 일축방향 하중을 가할시 가장약한 플라이에서 균열이 가고 그 균열로 인한 재료의 균질함은 약해지고 내부에서는 또다른 응력력작용이 일어나 파괴에 다다르게 된다. 본 FPR시험체의 경우 섬유방향 $[-45^{\circ}, 0^{\circ}, +45^{\circ}]$ 로 적층이 되어있다.

FRP시험체의 물성치와 강도를 이용하여 표 7에 파손을 일으키는 섬유방향 시험체의 임계하중을 구하였다.

섬유방향으로 인장을 가하였을 때 각 적층에 대해 수직방

Fig. 16. S-N curve of fiber direction test specimen

Table 5. Material properties of fiber direction test specimen

구분		재료성능
탄성계수(GPa)	E_L	24.316
	E_T	5.357
프라이송비	ν_{LT}	0.331
전단탄성계수 (GPa)	G_{LT}	5.184

Table 6. Strength of fiber direction test specimen

재료의 강도	
종방향 인장강도 X_t	1020 MPa
횡방향 인장강도 Y_t	40 MPa
전단강도 S	70 MPa

Table 7. Critical loads of fiber direction test specimen

조건	0°	45°	-45°
X_t	693.8	1709.5	1709.5
Y_t	1648.1	245.2	245.2
S	—	±178.6	±178.6

향(Y_t)에 의한 최초 파손은 가장 작은 값인 245.2 Mpa이고 $\pm 45^\circ$ 적층플라이가 파손된다. 임계응력이 178.6 Mpa가 도달하면 전단력에 의해 $\pm 45^\circ$ 플라이가 파손된다.

4.2 파손응력 분포도

시험체 모델링시 물림길이를 고려, 실제 인장을받는 부분만 모델링을 하였다. 적층 두께는 2.17 mm로 유리섬유의 $[+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ]$ 적층만을 고려하였다. 그림 17은 섬유방향 시험체의 파손시 응력분포도를 나타내었다. 섬유방향의 경우는 10.15 KN의 하중에서 플라이가 파손되는 것으로 계산이 되었다. 복합재료에 있어서 균열은 섬유와 기지사이의 계면을 따라 발생한다. 즉, 플라이가 파손이 됨으로서 복합재료 내부에 또다른 층간응력이 발생, 재료의 강도를 저하시키게 된다. 플라이 임계하중을 해석함으로써 각 적층각에 대한 강도를 예측하고 건설에서 사용될 복합재료의 유리한 적층방향을 알수 있었다.

Fig. 17. Failure stress distribution of fiber direction test specimen

5. 결 론

본 연구는 FRP 복합재료를 이용한 교량 바닥판의 개발 및 실용화에 관련된 연구로서, FRP재료의 구조재 활용을 위한 기반기술을 제공하기 위하여 연구하였으며, FRP 복합재료 바닥판 부재의 섬유방향의 인장 및 피로특성을 고찰하여 다음과 같이 결론을 도출하였다.

- 1) 정적 및 피로시험 결과 비슷한 응력범위에서 확연히 차이가나는 모습을 보여 균일성을 찾아볼 수 없었는데 이는 재료 불균일성이 심하기 때문이라 고찰할 수 있었다. FRP 제작시 고품질의 기능을 보장하기 위해서는 섬유의 배열 및 적층순서 및 비닐에스터의 합침 및 제품의 경화온도 제어 등 초기부터 마지막까지 철저한 품질관리 감독을 실시해야 할 것으로 판단된다.
- 2) $[-45^\circ, 0^\circ, +45^\circ]$ 의 적층의 경우 임계하중이 178.6 MPa에서 전단력에 의해 $\pm 45^\circ$ 플라이가 파손되었는데 이는 상당히 높은 강성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 섬유방향 시험체의 경우 200만회의 피로한계에 도달되는 최대응력은 84.12 Mpa로 DB-24하중이 작용할 경우 바닥판이 받는 응력이 10 Mpa 미만임을 고려할 때 충분한 안전성을 확보하였다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ji, H-S, Cho, Y-H., and Park, G-N (2002) Design and Field Application of FRP Bridge. KSCE, Vol. 50, No. 7, pp. 27-31.
- Jones, R.M. (1975) Mechanics of Composite Materials, McGraw-Hill Book Co.
- Kim, B.-J. and Kang, T.-J. (1994) Papers : Effect of Surface Treatment on the Fatigue Properties of Glass Fiber Reinforced 3-Dimensional Braided Composite. KSCM, Vol. 7, No. 3, pp. 77-86.
- Kim, Y.-P. (2004) The Influence of Repeated Loading Cycles on Strength Ratio of Carbon/Epoxy Composite Laminates. SeoulTech, Paper of Master's Degree.
- Lawrence, C. Bank, Composites for Construction Structural Design with FRP Materials, John Wiley & Sons, Inc.
- Lee, D.-G., Jung, G.-S., and Choi, J.-H., (1998) Mechanics of Composite Materials and Manufacturing Technology. Sigma Press.
- Lekhnitskii, S.G. (1963) Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body, Holden-Day, Inc.

- © 논문접수일 : 2012년 10월 11일
 © 심사회의일 : 2012년 10월 11일
 © 심사완료일 : 2012년 11월 01일