

**복합재료 사용 바닥판 부재의
응력집중부에 대한 피로성능 평가에 관한 연구**
**A Study on Fatigue Performance Evaluation of Stress
Concentration of Plate Members Using Composite Material**

박태영* · 박준석** · 김두환***

Park, Tai Young · Park, Joon Seok · Kim, Doo Hwan

Abstract

Recently the compound material has 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.

So this thesis evaluates the static and the fatigue performance for whether there are fiber lamination direction and stress concentration section of FRP floor plate, the compound material.

key words : FRP, stress concentration, fatigue

1. 서 론

최근 교량의 공용연수 증대와 과적차량 교통량의 증가에 따른 중, 소형 교량 열화손상이 심하여 안전에 관한 문제가 야기되고 있다. 복합신소재의 적용으로 위에서 언급한 문제를 해결할 수 있는 연구가 진행되고 있다. 이미 미국, 일본 등에서 섬유강화 복합재료(FRP)를 건설분야에 응용하려는 연구가 십수년 전부터 이루어져 있었고 국내에서도 항공우주, 기계분야 등에서 활발히 이용되어 왔으며 최근에는 건설분야도 활발한 연구가 진행되고 있다.

2. 연구내용 및 범위

본 연구에서는 FRP바닥판의 섬유적층방향과 응력집중부 유무에 따른 피로거동을 분석하고 S-N Curve를 도출하여 FRP바닥판 재료에 대한 실험적 자료를 건설기술에 응용하는데 목적이 있다. 따라서 교량부재의 구조 재료로서 복합신소재의 장점을 최대한 반영하고 예상되는 문제점을 예측 해결함에 있다.

3. 실험 내용

본 실험에서는 FRP바닥판 부재를 사용하여 ASTM-D3039 에서 추천하는 방법으로 진행 되었으며, 인장하중 재하방식은 변위제어이며 재하속도는 1mm/min으로 인장하중을 가하였다. 피로시험의 경우 일정진폭

* 서울산업대학교 구조공학과 · 석사과정 · E-mail : bbareng7@hanmail.net

** 서울산업대학교 구조공학과 · 석사과정

*** 정희원 · 서울산업대학교 구조공학과 · 교수

반복하중으로 실시하였으며 파형은 HaverSine, 재하속도는 섬유직각방향 시험체, 섬유방향시험체 각각 25Hz, 13Hz로 재하 하였다.

4. 실험 결과

4.1 인장실험 결과 및 고찰

섬유방향 및 섬유직각방향 시험체의 인장실험 결과로부터 극한강도, 탄성계수등의 기계적 성질을 측정하여 표 4.1~2와 같이 나타내었다.

표 4.1 섬유직각방향 FRP 시험체 정적시험 결과

	No.	인장응력 (MPa)	최대변형률 (10^{-6})
섬유직각 방향 시험체	TT-1	74.28	6316
	TT-2	64.94	11865
	TT-3	64.96	4404
섬유직각 방향 HOLE 시험체	TTH-1	53.201	1788
	TTH-2	40.82	1656
	TTH-3	37.26	1561

표 4.2 섬유방향 FRP 시험체 정적시험 결과

	No.	인장응력 (MPa)	최대변형률 (10^{-6})
섬유방향 시험체	TL-1	231.27	13502
	TL-2	210.67	17385
	TL-3	251.22	14615
섬유방향 HOLE 시험체	TLH-1	179.50	2685
	TLH-2	210.92	2972
	TLH-3	197.50	3447

섬유방향 시험체와 섬유방향 HOLE 시험체 모두 평균인장응력에 약 10%내에 해당하는 인장응력을 보였으며, 변형률 역시 안정적인 모습을 보였다. 또한, 섬유직각방향과 섬유방향의 각각에 대한 응력 집중부의 인장응력은 섬유직각방향의 경우 평활 시험체가 HOLE 시험체 보다 55%의 인장응력의 상승이 있었고, 섬유방향의 경우에도 HOLE 보다 평활 시험체가 18%높은 인장응력이 나왔다.

4.2 피로실험 결과 및 고찰

피로실험 결과는 가한 응력(S)과 사이클수(N)의 관계로 나타내며, FRP 섬유직각방향과 섬유방향, 그리고 섬유직각방향HOLE과 섬유방향HOLE의 피로시험 결과로부터 나온 S-N 선도는 그림 4.1과 같다.

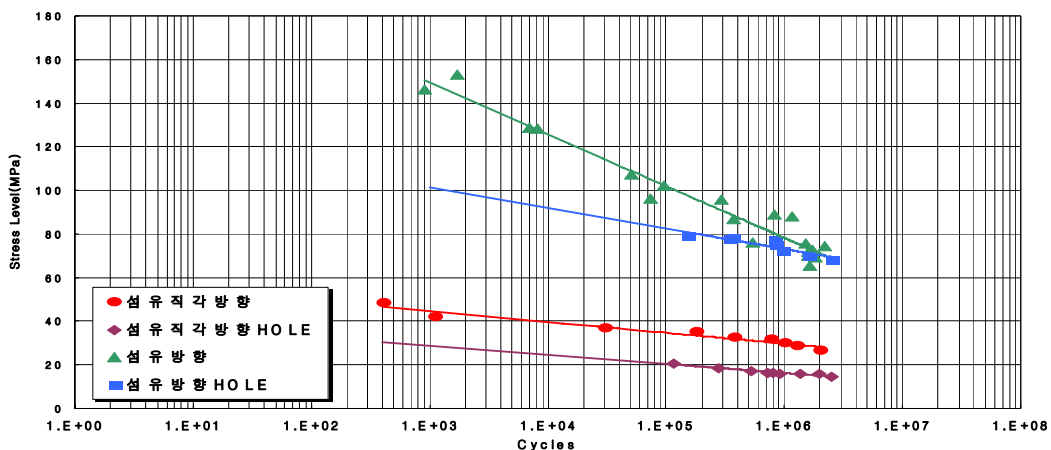


그림 4.1 FRP 시험체 S-N선도

섬유직각방향과 섬유방향 시험체의 경우 각각 인장응력의 43%, 36%에서 200만회를 만족하는 피로한도를 보였고, 섬유직각방향 HOLE 시험체 와 섬유방향 HOLE 시험체 역시 인장응력의 37%, 39%에서 피로한도를

보였다. 섬유방향 시험체는 직각방향에 비해 2.5배의 피로하중을 가지고 있었다.

각 적층형태에 대한 응력 집중부의 피로한도는 섬유 방향의 경우 평활 시험체에 비해 10%정도 낮은 피로한도를 가졌으며, 섬유직각방향의 경우는 평활 시험체에 비해 응력집중부를 가진 시험체가 45% 낮은 피로한도를 가지는 것으로 확인됐다.

5. 응력집중계수에 대한 고찰

Lekhnitskii는 구멍 주위에서의 θ 방향의 평균응력 σ_a 를 다음과 같이 유도하였다.

$$K_r = \frac{\sigma_a}{\sigma_0} = \frac{-K\cos^2\theta + (1+n)\sin^2\theta}{\sin^4\theta - m\sin^2\theta\cos^2\theta + K^2\cos^4\theta}$$

위의 식에 의하여 응력집중계수를 구해서 표 5.1에 나타내었다.

표 5.1 응력집중계수 계산 결과

구 분		응력집중계수(K)
등방성물질(강재, 알루미늄 등)		3
FRP	섬유직각방향 HOLE 시험체	2.35
	섬유방향 HOLE 시험체	3.88
섬유직각방향 HOLE 시험체 / 등방성물질		0.78
섬유방향 HOLE 시험체 / 등방성물질		1.29

응력집중은 반복하중을 받을 때 중요하다. 균열은 최고 응력점에서 시작되어 하중이 반복됨에 따라 재료를 통하여 점차적으로 전파되기 때문이다. 많은 경우 이론적인 응력집중계수의 값을 사용하는 것은 너무 지나치다고 한다. 응력집중을 가진 시편에 대하여 피로시험을 해보면 통상적으로 피로한도를 K로 나누어 구한 수준보다 더 높은 수준의 공칭응력에서 파괴가 일어난다. 즉, 반복하중을 받는 구조용 부재는 응력집중에 민감하지 않다. 하지만, FRP같은 취성재료의 경우 소성재료와 달리 정하중을 받을시 응력집중이 파단점까지 유지된다. 따라서 정하중을 받는 취성재료(FRP)를 설계 할 경우 응력집중을 고려해야 할 것이다.

6. 구조해석

파손기준 산정을 위해 섬유직각방향 $[-45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]$, 섬유방향 $[-45^\circ, 0^\circ, -45^\circ]$ 의 단적층만 고려하여 최초 파손을 일으키는 임계(Critical)하중을 표 6.1~2와 같이 구하였고, 이에 따른 응력분포 영향을 고려하기 위하여 구조해석 범용 프로그램인 Midas/Gen 6.3을 이용하여 구조해석을 실시한 결과를 그림 6.1~4에 나타내었다.

표 6.1 섬유직각방향 시험체 임계하중(MPa)

조건	90°	45°	-45°
Xt	-4808.2	951.8	951.8
Yt	80.4	136.6	136.6
S	-	±121.5	±121.5

표 6.2 섬유방향 시험체 임계하중(MPa)

조건	0°	45°	-45°
Xt	693.8	1709.5	1709.5
Yt	1648.1	245.2	245.2
S	-	±178.6	±178.6

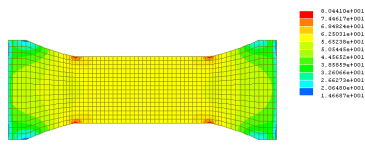


그림 6.1 섬유직각방향 시험체 파손응력 분포도

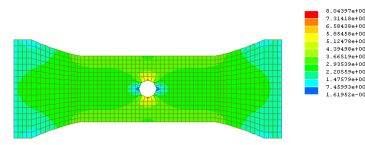


그림 6.2 섬유직각방향 HOLE 시험체 파손응력 분포도

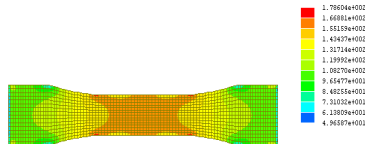


그림 6.3 섬유방향 시험체 파손응력 분포도

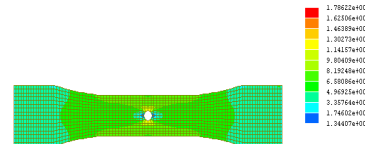


그림 6.4 섬유방향 HOLE 시험체 파손응력 분포도

섬유직각방향 시험체의 경우 섬유직각방향의 최초 플라이 파손은 80.4MPa의 임계하중이 작용할 때 90°플라이에 수직방향으로 부터 파괴가 됨을 알 수 있었고, 섬유직각방향의 최초 플라이 파손은 178.6MPa의 임계하중이 작용할 때 ±45°플라이에 수직 방향으로부터 파괴가 됨을 알 수 있었다. 즉, [-45°,90°,+45°]적층은 구조적으로 인장에 대한 내구성이 약함을 알 수 있었다.

7. 결론

정적시험결과 섬유직각방향 시험체와 섬유직각방향 HOLE 시험체는 각각 68.06MPa, 43.76MPa로 섬유직각방향 시험체가 약 55%높은 인장응력이 나왔다. 섬유방향 시험체와 섬유방향 HOLE 시험체는 231.05MPa, 195.97MPa로 섬유방향 시험체가 약 17%의 응력상승이 있었다.

섬유직각방향 시험체, 섬유직각방향 HOLE 시험체, 섬유방향 시험체, 섬유방향 HOLE 시험체의 경우 각각 200만회 피로한계에 도달되는 최대응력은 29.24MPa, 16.26MPa, 84.12MPa, 75.56MPa로 DB-24하중이 작용할 경우 바닥판이 받는 응력이 10MPa 미만임을 고려할 때 충분한 안전성을 확보하였다고 판단된다. 또한, 각 섬유적층방향에 따른 응력집중부에 대해 각각 44%, 11%정도 낮은 피로한계를 보였다.

응력집중계수 계산결과 섬유직각방향 HOLE 시험체의 응력집중계수 K = 2.35 로 나왔으며 등방성 물질에 78%에 해당하는 응력집중계수가 산출되었다. 이는 섬유직각방향 HOLE 시험체의 경우 응력집중이 등방성물질보다 낮아서 원형노치(HOLE)를 고려한 설계를 할 때 유리함을 가져다준다. 하지만, 강제(SS400의 허용응력 140MPa)와 같은 등방성 물질에 비해 섬유직각방향 HOLE 시험체의 응력은 강재의 31%정도 밖에 안된다. FRP사용 바닥판 부재는 이러한 단점을 고려한 설계를 필요시 한다. 섬유방향 HOLE 시험체의 경우 응력집중계수 K = 3.88로 산출되었으며 등방성 물질에 비해 29% 높은 수치이다. 섬유방향의 경우 강성이 강하지만, 응력집중에 취약한 모습을 보였다.

참고문헌

1. 지효선 조영환 박계남 (2002), “복합신소재(FRP)교량의 설계 및 현장적용.” 대한토목학회지, 제50권 제7호.
2. 이창수 황운봉 (1999), “비선형 변형 거동을 갖는 섬유강화 복합재료의 피로수명 예측”한국복합재료학회지, 제12권 제4호, pp.1~7.
3. 이창수 황운봉 한정섭 (1991), “복합재료의 피로손상 모형 및 다응력 수위 피로수명 예측 연구(1)-참고계수를 이용한 피로수명 예측-”한국복합재료학회지, 제4권제1호, pp.95~106.
4. 이대길 정광섭 최진호, (1998), “복합재료 역학 및 제조기술.” 시그마프레스.