

성능향상된 교량 바닥판에서의 피로수명에 대한 확률론적 해석

Probabilistic Analysis on the Fatigue-Life of the Strengthened Bridge Decks

심종성* 오홍섭** 류승무*** 박성재****

Sim, Jong Sung Oh, Hong Seob Ryu, Seung Moo Park, Sung Jae

ABSTRACT

This study shows the fatigue test results of experiment on the strengthened slabs, the probability analysis of the fatigue behavior is also presented. Static and fatigue tests were performed on bridge decks strengthened with fiber plastics(Carbon Fiber Sheet, Glass Fiber Sheet, Grid Type Carbon Fiber). In this study, to analyze the probabilistic distribution of the fatigue life, the Weibull distribution was adopted. The Weibull distribution coefficient is inferred from the S-N diagram and the number of repeated load. As the result of analysis, as the stress level is higher, the fatigue limit life of the strengthened bridge decks are similarly discovered but in the range of the fatigue limit, CG specimen that was strengthened with Grid Type Carbon was proved most effective of reinforcement.

1.서론

교량 바닥판의 성능향상은 내하력의 향상과 함께 피로수명이 연장되어야 한다. 따라서 효율적인 보강설계를 위해서는 정적 내하력을 기준으로 설계된 단면에 대하여 보강 후의 수명을 예측함으로써 구조물의 요구수명에 적합한 최종적인 보강설계를 수행할 수 있을 것이다. 또한 구조재료의 강도나 작용하중 등의 설계요소들은 일반적으로 통계적 분산성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 설계자들은 이러한 불확실성을 반영할 수 있는 설계용력을 채택하여 정확한 피로저항성을 확보하여야 한다[오병환, 1985]. 이러한 불확실성을 고려할 수 있는 유효한 방법은 확률론적 신뢰이론으로 접근하는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 일방향 섬유로 성능향상된 교량 바닥판의 피로 실험을 수행한 결과와 확률해석에 의한 회귀분석식 및 피로강도를 비교하여 피로수명 분포특성을 고찰하고자 하였으며, 이러한 결과로부터 피로해석에 적합한 것으로 알려진 Weibull 분포를 적용하여 응력수준별 수명분포도, 파괴 확률 그리고 일방향 섬유 보강재료에 대한 위험함수 등을 고찰하고자 하였다.

* 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사후연구원

*** 정희원, (주)현대건설

**** 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

2. 시험변수 및 실험 결과

2.1 시험변수 및 자원

본 연구에 사용되어진 콘크리트는 재령 28일 압축강도가 240 kgf/cm²인 레디 믹스트 콘크리트를 사용하였으며, 슬럼프 값은 12cm로 측정되었다. 교량 바닥판에 사용되어진 주철근 및 배력철근의 항복용력은 3,000 kgf/cm²인 D16 철근을 배근하였다. 실제 교량 바닥판과 유사한 일방향과 이방향 파괴 메카니즘을 모사하기 위하여 시험체는 도로교 구조설계기준에 준하여 공용중인 교량과 유사하게 설계, 제작하였다.

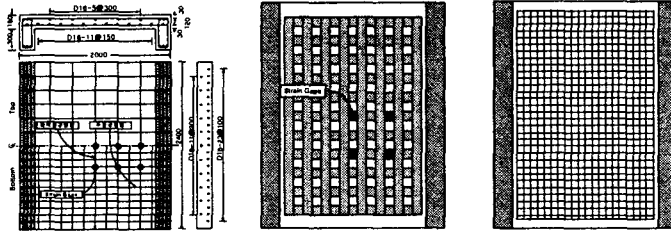


그림 1 시험체 자원 (단위 : cm)

표 1 철근 및 보강재의 역학적 성질

재료 \ 물성	항복강도 (kgf/cm ²)	극한강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	극한변형률 (%)
철근	3,000	-	2.00×10 ⁶	-
GFS	-	5,000	2.52×10 ⁶	2.0~3.0
CFS	-	35,500	2.35×10 ⁶	2.1
CG	-	14,000	1.00×10 ⁶	-

여기서 GFS : 유리섬유, CFS : 탄소섬유, CG : 격자형 탄소섬유

표 2 동적 시험체 실험변수 및 실험결과

시험체	응력수준	재하하중 (tonf)	파괴하중 (tonf)	횟수(회)	시험체	응력수준	재하하중 (tonf)	파괴하중 (tonf)	횟수(회)
CON	40	26	57.5	100만	GFS	40	28	73.24	100만
	70	45	-	68,834		60	42	-	466,611
	90	58	-	10		70	56	-	1,367
CFS	60	44	68.2	100만	CG	60	43	-	501,982
	70	51	-	90,074		70	50	-	864,408
	80	59	-	19,836		80	57	-	20,023

2.2 실험결과

정적성능시험에서는 하중이 증가함에 따라 초기의 일방향 거동으로 외력에 저항하던 시험체가 균열이 발달함에 따라 내력의 재분배가 진행되어 이방향 거동을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 피로시험 결과에서는 하중반복횟수가 적은 경우 일방향 거동에 의해 외력에 저항하던 시험체는 하중반복횟수가 증가됨에 따라 균열의 개수가 증가하였고 균열폭이 증가하여 점차 이방향 거동을 보이는 것으로 나타났다. 모든 시험체가 편칭파괴 되었다.

3. 확률론적해석 및 분석결과

3.1 Weibull 분포

Weibull 분포함수는 피로거동에 대한 물리적 현상을 잘 설명할 수 있으며 실험적으로도 입증되어 금속의 피로 해석에 널리 적용되고 있으며, 콘크리트 구조물의 경우 적용하는 연구실적은 적으나 피로거동예측에 적합한 것

로 연구되었다[오병환 1985, 장상훈 1998]. Weibull 분포로서 확률밀도함수(PDF)와 누적분포함수(CDF)는 다음과 같이 식 1과 2로 표시할 수 있다.

$$\text{PDF} : f_N(n) = \frac{k}{u-n_0} \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^k \right] : n \geq n_0 \quad (1)$$

$$\text{CDF} : F_N(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^k \right] : n \geq n_0 \quad (2)$$

여기서, u = Characteristic life parameter occurring at point where 63.2 percent have fail, k = 형상변수(Shape parameter), n_0 = 최소수명(Minimum life), n = 시험체의 수명(Specimen life)이다. 피로하중을 받는 구조물의 성능에 대한 일반적인 특성은 위험함수(Hazard Function)에 의해 판단할 수 있다. 일반적인 위험함수는 피로하중으로 회복되지 않는 손상이 누적됨에 따라 단조증가를 하게 된다. 여기서 위험함수는 재료가 시간간격(0, t) 사이에 존재한다고 생각했을 때 시간(t, t+dt) 사이에서의 파괴될 확률을 의미한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{L(t) - L(t + \Delta t)}{\Delta t L(t)} = \frac{1}{L(t)} \left(- \frac{d}{dt} L(t) \right) = \frac{f(t)}{L(t)} \quad (3)$$

여기서, $f(t)$ = 확률밀도함수(Probability Density Function)이다.

Weibull 분포의 위험함수(Hazard Function)는 식 (1)과 식 (2)를 식 (3)에 대입하여 다음과 같이 계산된다.

$$h_N(n) = k \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^{k-1} \quad n \geq n_0 \quad (4)$$

Weibull 분포도의 확률밀도함수에서 피로수명의 폭은 특성치 u 에 의하여 결정될 수 있으며, 기울기 값은 형상계수 k 에 의해 결정할 수 있다. 일반적으로 매개변수 k, u 는 여러가지 방법으로 추정할 수 있지만, 본 연구에서는 피로실험결과의 S-N 관계를 기준으로 하여 그 값을 추정하였다. 피로실험결과로부터 응력과 반복횟수에 대한 회귀분석식은 $N \times S^A = B$ 와 같이 나타낼 수 있으며, 피로수명 N 값이 Weibull 분포를 따를 경우 매개변수 k 와 u 는 식 5와 같이 나타내어 구할 수 있다.

$$k^2 = \frac{\pi^2}{6s^2}, \quad \ln u = \frac{0.5772}{k} + \ln(B \times S^{-A}) \quad (5)$$

여기서, s = $\ln N$ 의 추정에 대한 표준편차(Standard deviation of $\ln N$), A, B = 시험상수(Experimental constant value), S = 응력수준(Stress level)이다.

또한 주어진 응력수준에 대한 평균피로수명은 다음과 같이 각각 식 (5)와 식 (6)으로부터 구할 수 있다.

$$E[N] = u \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) = B \times S^{-A} \exp \left[\frac{0.5772}{k} \right] \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (6)$$

설계피로수명 N_D 는 피로파괴가 일어날 확률을 최소화시킬 수 있도록 정하여 설계하여야 하며 이때의 파괴확률 p_f 는 $p_f = P(N < N_D) = F_N(n)$ 이므로 누적분포함수와 동일하다. 따라서 파괴확률 p_f 에 대응하는 설계수명 N_D 는 식 2로부터 식 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_D = u \left[\ln \left(\frac{1}{1-p_f} \right) \right]^{1/k} \quad (7)$$

3.2 Weibull 분포에 따른 성능향상된 시험체의 피로강도해석

실험결과 무보강 및 보강 시험체의 S-N 관계에 의한 회귀분석식은 식 (8) ~ (11)식과 같다.

무보강 시험체(CON) : $N_f S^{30.279} = 1.795$ (8)

유리섬유 보강 시험체(GFS) : $N_f S^{25.126} = 2.633$ (9)

탄소섬유 보강 시험체(CFS) : $N_f S^{33.254} = 1.962$ (10)

격자형 탄소섬유 보강 시험체(CG) : $N_f S^{38.948} = 1.392$ (11)

표 3 시험체의 확률분포에 따른 계수

	CON	GFS	CFS	CG	비고
k	2.827	1.399	1.325	2.702	형상함수
A	30.279	25.126	33.254	38.948	실험상수
B	1.795	2.633	1.962	1.392	실험상수
s	0.454	0.917	0.968	0.475	표준오차

표 4 시험체의 각 응력수준별 특성치와 평균수명

	응력수준	평균피로수명 E(N)	특정치 u	파괴확률 P_f		
				0.01	0.05	0.10
CON	0.9	18.404	18.526	7.822914	13.92398	17.96156
	0.7	60,731	61,132	15781.9	28090.17	36235.55
	0.4	4.15×10^{12}	4.18×10^{12}	3.61×10^{11}	6.42×10^{11}	8.28×10^{11}
GFS	0.8	698	707	22.25777	71.37167	119.4009
	0.6	1,424,233	1,446,295	30667.96	98339.74	164517
	0.4	6.58×10^{10}	6.68×10^{10}	8.15×10^8	2.61×10^9	4.37×10^9
CFS	0.8	4,660	5,065	83.8796	286.9674	494.0124
	0.7	395,249	429,562	7113.948	24338.11	41897.9
	0.6	66,543,827	72,320,813	1197699	4097548	7053901
	0.4	4.77×10^{13}	5.19×10^{13}	8.59×10^{11}	2.94×10^{12}	5.06×10^{12}
CG	0.8	9,116	10,250	1120	2230	2911
	0.7	1,653,753	1,859,595	221359	404633	528142
	0.6	669,721,341	753,081,472	89644131	1.64×10^{18}	2.14×10^{18}
	0.4	4.8×10^{15}	5.4×10^{15}	7.27×10^{14}	1.33×10^{15}	1.74×10^{15}

표 5 시험체의 실험 및 확률해석을 통한 회귀분석식 및 피로한계

		회귀분석식	피로한계	하중 (tonf)	확률/실험
CON	E	$S = 1.00930 - 0.06300 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	63.0%	40.32	1.08
	P	$S = 0.97039 - 0.04865 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	67.8%	43.39	
GFS	E	$S = 1.01285 - 0.06800 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	60.5%	42.68	1.06
	P	$S = 0.98149 - 0.05517 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	65.0%	45.86	
CFS	E	$S = 1.00451 - 0.05551 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	67.0%	49.26	1.06
	P	$S = 0.97378 - 0.04407 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	70.9%	52.12	
CG	E	$S = 1.00299 - 0.04971 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	70.5%	50.23	1.05
	P	$S = 0.96587 - 0.03806 \times \text{Log}_{10}(N_f)$	73.8%	52.56	

여기서, E는 실험값에 의한 S-N 곡선, P는 확률해석에 의한 S-N 곡선

표 5는 무보강 시험체와 보강 시험체에 대한 확률해석을 통한 회귀분석식과 피로강도를 나타내고 있다. 표에서도 나타나는 바와 같이 피로 반복회수 100회일 때의 피로강도는 정적강도의 60% 이상의 값을 모두 나타내고 있다. 콘크리트 구조물에서의 피로한계는 약 100만회~200만회일 경우를 나타내고 있으며, 본 연구에서 제안된 Miner 이론에 의한 S-N 관계로부터의 피로한계는 무보강 시험체와 보강 시험체의 경우 각각 표 5와 같이 모든 시험체에 있어서 60%이상의 값을 가진다. 이러한 응력수준에 대한 하중값은 무보강 시험체에 비해 상대적으로 보강 시험체가 큰 것으로 나타나 보강효과를 확인할 수 있다. 또한 사용하중상태인 파괴하중의 40%일때의 수명은 탄소섬유шит 보강 시험체와 격자형 탄소섬유 보강 시험체의 경우 그 수명이 무보강에 비해 크게 나타났으나 유리섬유шит 보강 시험체의 경우 그 값이 더 작은 것으로 나타났다. 그러나 실험결과와 비교해 볼 때 무보강 시험체의 경우 100만회 이후의 파괴하중이 정적파괴하중에 비해 약 10%정도의 손상이 발생한 것으로 나타났으나, 유리섬유шит 보강 시험체의 경우 73.24ton으로 전혀 손상이 발생되지 않은 것으로 나타났다. 따라서 실험값에 의한 S-N과 확률해석을 통한 S-N 관계에 대한 피로 한계값을 비교해 보면 실험값과 확률해석을 통한 피로한계는 약 5%~8%의 오차를 가지고 있다.

3.3 위험 함수

보강 시험체의 피로수명 100만회에 대한 응력수준 70%인 경우, 파괴확률은 격자형 탄소섬유, 탄소섬유шит, 유리섬유шит 순으로 나타났으며, 그 값은 격자형 탄소섬유의 경우 약 17%이며, 탄소섬유шит는 약 93%이고, 유리섬유шит는 약 100%에 가깝게 나타났다. 파괴확률의 값은 응력수준이 낮은 상태에서는 더 큰 차이를 나타내며, 응력수준이 높은 상태에서는 그 차이가 적다. 이러한 결과는 S-N 관계에서와 응력수준이 높은 상태에서의 수명예측값은 유사하게 나타나지만, 응력수준이 낮아질수록 격자형 탄소섬유 보강 시험체와 탄소섬유шит 보강 시험체의 피로수명이 다른 시험체에 비해 상대적으로 긴 것과 마찬가지로이다. 따라서 CG 시험체와 CFS를 사용한 경우 응력수준이 낮을수록 보강효과가 우수함을 알 수 있다.

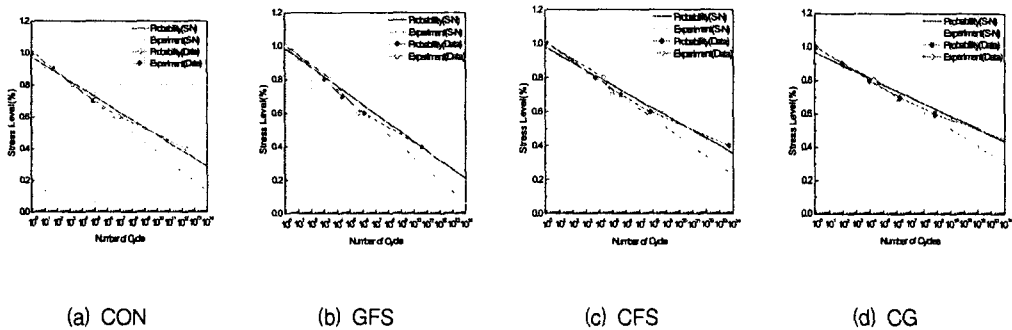


그림 2 확률론적 해석을 통한 시험체 확률수명예측

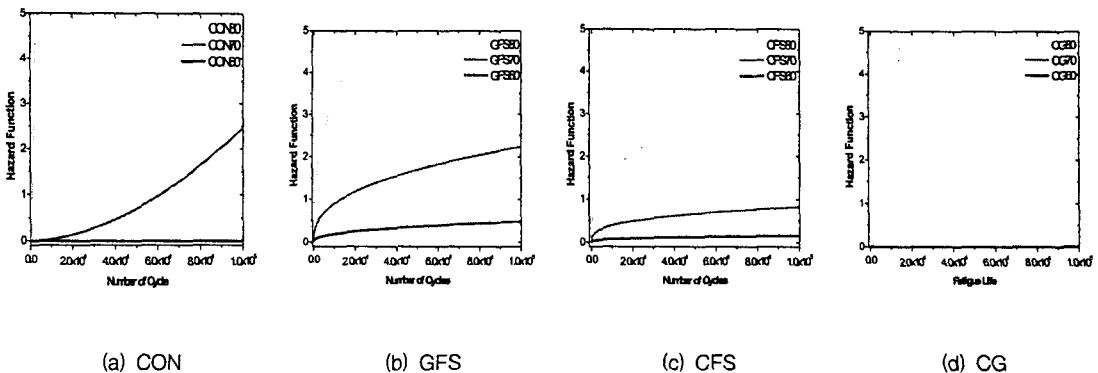


그림 3 시험체별 위험 함수

위험함수는 피로하중을 받는 구조물의 피로손상의 누적손상정도를 나타낸다. 격자형 탄소섬유 보강시험체의 경우 응력수준이 낮은 상태에서 반복하중이 증가할수록 그 파괴확률이 보강시험체 중에서 가장 적은 것으로 나타났으나, 응력수준이 높아질수록 급격한 파괴확률을 나타낸다. 이는 격자형 탄소섬유 보강 시험체가 피로하중에 대한 취성재료로 판단된다. 이에 비해 탄소섬유 보강 시험체의 경우 응력이 낮은 상태에서는 격자형 탄소섬유에 비해 초기의 위험함수가 급격히 증가하나, 반복회수가 증가함에 따라 그 증가량이 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 높은 응력수준에서도 유사하게 나타났다. 따라서 탄소섬유 보강 시험체는 격자형 탄소섬유 시험체에 비하여 피로하중에 대하여 연성재료인 것으로 판단된다. 즉 통과 교통하중의 분포중에서 응력수준이 낮은 하중의 통과차량이 대부분일 경우에는 상대적으로 격자형 탄소섬유 보강재를 이용한 보강공법의 적용이 효과적인 것이며, 응력수준이 높은 교통하중의 분포가 상대적으로 자주 통과할 경우에는 그 위험성이 상대적으로 낮은 탄소섬유 보강 시험체의 적용이 타당할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 피로하중을 받는 교량 바닥판의 피로수명을 예측하기 위하여 Miner 이론에 의한 S-N관계로부터 피로수명을 예측하였으며, 정확한 신뢰성 확보를 위하여 확률해석방법을 제시하였다. 이로부터 도출한 결론은 다음과 같다. S-N관계에서 피로한계 이상에서의 수명은 거의 동일하게 나타났다, 확률해석결과 격자형 탄소섬유 보강 시험체가 응력수준별 Weibull 분포에서 신뢰성은 다른 시험체에 비해 떨어지지만, 파괴확률은 다른 시험체에 비해 더 적은 것으로 나타났으며, 그 편차는 응력수준이 낮아질수록 더욱 크지는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 (주)엠에스아시아의 “NEF-MAC 보강공법을 적용한 콘크리트 구조물의 동적시험에 의한 성능향상 효과분석”, (주)콘크리트의 “유리섬유 보강공법을 적용한 콘크리트 교량 상판의 정적 및 동적시험에 의한 성능향상 효과분석”, (주)한국카본의 “탄소섬유 보강공법을 적용한 콘크리트 구조물의 동적시험”에 관한 연구를 수행함으로써 얻어진 결과이며, 저자들은 각 업체의 후원에 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. 권혁문, “도로교 RC 바닥판의 피로파괴에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 논문집, 제 5권 3호, 1993. 03.
2. 심중성, “탄소섬유 보강공법을 적용한 콘크리트구조물의 동적시험,” 한국카본, 2001.
3. 오병환, “콘크리트 피로강도 및 피로신뢰성해석에 관한 이론 및 실험연구,” 대한토목학회 논문집, 제5권, 4호, 1985. 12.
4. 장상훈, “탄소섬유쉬트로 보강한 R/C보의 피로거동에 관한 실험 및 해석적 연구,” 한양대학교 석사학위논문, 1998.
5. Freudenthal A. M., “Prediction of fatigue Failure,” Journal of Applied Physics Vol. 21, No. 12, Dec., 1968, pp47~69.