

강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 철근콘크리트 보의 피로해석

Fatigue Analysis of RC Beams Strengthened by Steel Plate or Carbon Fiber Sheet

심 종 성^{*}

Sim, Jong Sung

배 인 환^{***}

Bae, In Hwan

황 의 승^{**}

Hwang, Eui Seung

장 상 훈^{****}

Jang, Sang Hoon

ABSTRACT

In this study, the fatigue tests are performed on simply-supported R/C beams strengthened with steel plate and CFS(Carbon fiber sheet). Analysis results by Weibull distribution are compared with the test data. The unknown Weibull distribution parameters are estimated based on observations recorded in fatigue test. Safety factors for the number of cycles and the stress level are obtained. S-N-P curves are also generated from these tests and probabilities of failure.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

철근콘크리트구조물은 공용하중의 증가와 여러 가지 요인에 의한 열화로 인하여 보강이 실시되고 있다. 최근에 콘크리트 구조물의 피로거동에 대한 관심은 많으나 아직까지 피로에 대한 규정은 확립되지 않았으며, 또한 보강된 구조물의 복합체로서의 피로거동에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

지금까지는 콘크리트 피로수명을 예측하는데 있어서 실험결과에 의한 S-N선도를 이용하였다. 그러나 피로실험자료는 변화성과 불규칙성을 보이기 때문에 정확한 피로저항성을 확보하기 위해서는 확률론적 개념을 도입하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 강재의 피로해석에 널리사용되는 Weibull분포를 이용하여 보강된 콘크리트보의 피로수명을 예측하고자 한다.

-
- 1) * 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 부교수
 - 2) ** 정희원, 경희대학교 토목공학과 조교수
 - 3) *** 한양대학교 토목공학과 박사과정
 - 4) **** 한양대학교 토목공학과 석사과정

2. 실험

2.1 실험개요

본 연구에서는 단순 R/C보 (15×25×24cm)를 제작한후, 인장부위의 하단면에 강판보강재와 CFS (Carbon fiber sheet) 보강재를 접착하였다. 재하하중은 정적최대 극한하중의 60%, 70%, 80%로 하였으며 응력비는 0.1로 일정하였고, 재하속도는 2Hz의 속도로 시험체가 파괴될때까지 단진재하하였다. 시험체의 피로거동과 수명을 예측하기 위하여 LVDT와 철근의 변형계이지를 시험체의 중앙에 설치하여 하중단계별로 처짐과 변형량을 측정하였다[그림.1]

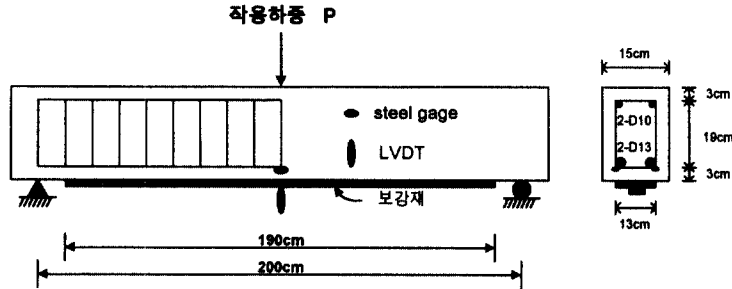


그림.1 피로시험체의 제원 및 재하방법

2.2 실험결과

실험결과 그림.2과 그림.3는 보강재료별 피로파괴양상을 나타내고 있다. 강판보강재인 경우 보강재가 반복하중에 의해 피로파괴되어 시험체가 파괴되었다. 그러나 CFS로 보강한 경우는 정적거동과는 달리 접착계면에서의 균열전파로 보강재가 모체에서 이탈하여 파괴되었다.

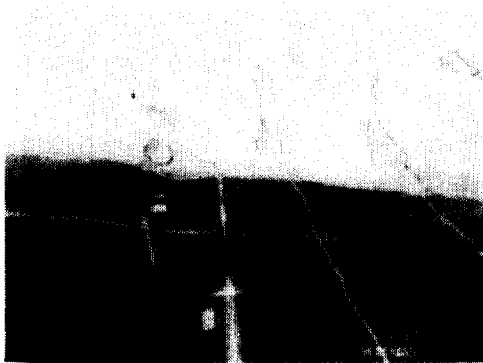


그림.2 강판보강시험체의 피로파괴양상

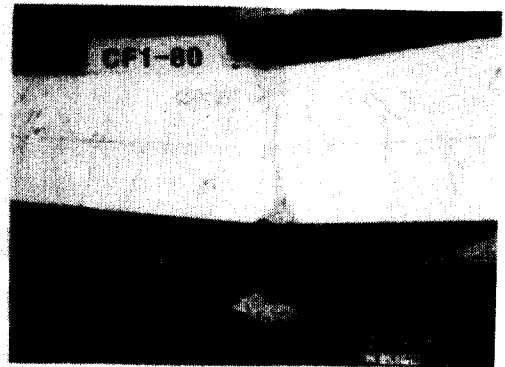


그림.3 CFS 보강시험체의 피로파괴양상

표.1은 파괴시 반복회수와 피로하중의 크기를 시험체별로 정리한 것으로 시험체 설계시는 정적 최대 하중을 동일하게 하였으나, 정적 실험결과 강판보강인 경우가 CFS 보강보다 크게 나타났다.

표.1 시험체별 파괴시 반복회수 및 피로하중크기 (단위 : ton)

시험체명	파괴시 반복회수	최대하중(Pmax)	최소하중(Pmin)	정적최대 하중
CF1-60	211,556	3.9	0.4	6.5
CF2-60	1,000,000			
CF1-70	-	4.4	0.45	
CF2-70	116,266			
CF1-80	48,546	5.0	0.5	
CF2-80	5,500			
SP1-60	538,994	5.4	0.55	9
SP2-60	267,253			
SP1-70	156,204	6.3	0.63	
SP2-70	75,552			
SP1-80	2,309	7.2	0.7	
SP2-80	4,429			

3. 확률론적 해석 및 분석결과

3.1 Weibull 분포

대수정상분포함수(lognormal distribution function)가 수학적 편의성 때문에 금속피로에 널리 사용되었지만, Weibull분포가 피로거동에 대한 물리적 현상을 잘 설명할 수 있기 때문에 피로해석에 적합하다고 알려졌다.²⁾ Weibull 분포를 콘크리트의 피로에 적용하는 연구실적은 극히 적으나 피로거동예측에 적합한 것으로 알려졌다.¹⁾

Weibull 분포의 확률밀도함수 (PDF)와 누적분포 함수(CDF)는 식.1과 식.2로 표시 할 수 있다.

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

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

여기서, u = Characteristic life parameter occurring at point where 63.2 percent have failed

k = 형상 변수 (shape parameter),

n₀ = 최소수명 (minimum life) 이다.

Weibull 분포도의 일반적인 확률밀도함수에서 피로수명의 폭은 특성치 u에 의하여 결정되며 기울기는 형상계수 k에 의하여 결정된다. Weibull 분포에서 변수는 u, k, n₀이지만 n₀=0인 경우가 피로 거동예측에 더 적합하다고 알려져 있다.²⁾ 보강된 시험체의 피로 실험결과를 이용하여 매개변수 k, u를 구하면 다음과 같다. 피로실험결과로부터 응력과 반복회수에 대한 회귀분석식은 $N \times S^A = B$ 과 같으며, 피로수명 N이 Weibull분포를 따를 때, 매개변수 k, u는 식.3과 같이 구할 수 있다.

$$k^2 = \frac{\pi^2}{6s^2} \quad , \quad \ln u = \frac{0.5772}{k} + \ln(B \times S^{-A}) \quad (3)$$

여기서, s는 lnN의 추정에 대한 표준편차이다.

주어진 응력수준에 대한 평균피로수명은 식.3으로부터 식.4와 같이 구할 수 있다.

$$E[M] = u \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = B \times S^{-A} \exp\left[\frac{0.5772}{k}\right] \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

설계수명 N_D 는 피로파괴가 일어날 확률을 최소화 시킬 수 있도록 정해져야하며, 파괴확률 $p_f = P[N < N_D] = F_N(n)$ 이므로 누적분포함수와 동일하다. 따라서 파괴확률 p_f 에 대응하는 설계수명 N_D 는 식.2로부터 식.5와 같다.

$$N_D = u \left[\ln\left(\frac{1}{1-p_f}\right) \right]^{1/k} \quad (5)$$

요구되는 평균피로 수명은 식.4 및 식.5부터 식.6과 같다.

$$E[M] = N_D \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) (p_f)^{-1/k} \Rightarrow N_D = \frac{E[M]}{\phi} \quad (6)$$

여기서, ϕ 는 설계수명에 대한 안전계수로 해석될 수 있다.

3.2 Weibull분포에 따른 보강시험체의 피로강도해석

3.2.1 보강 시험체의 확률해석 결과

실험결과 강관 및 CFS보강 시험체의 S-N선도에 의한 회귀분석식은 식.7 및 식.8과 같다.

$$S = N_f^{-0.0538559} \times 1.24601 \Rightarrow N_f S^{18.568} = 59.38 \quad (7)$$

$$S = N_f^{-0.0647744} \times 1.4553 \Rightarrow N_f S^{15.438} = 327.87 \quad (8)$$

Weibull 분포의 계수를 구하기 위하여 회귀분석에 의한 피로수명과 실험에 의한 피로수명을 표.2와 같이 정리 하였다.

표.2 보강 시험체의 각 응력수준별 회귀분석에 의한 값과 실험값

응력수준	강관 보강 시험체		탄소섬유쉬트 보강 시험체	
	회귀분석 결과값	실험값	회귀분석 결과값	실험값
60 % => S=0.6	781,497	538,994	872,173	211,556
		267,253		1,000,000
70 % => S=0.7	44,654	156,204	80,738	116,266
		75,552		
80 % => S=0.8	3,742	4429	10,275	48,546
		2309		5,500

표.2로부터 강관 보강 시험체인 경우 표준편차 s는 0.6618 이고, 식.3으로부터 형상변수 k는 1.938 이며, 특성치 u는 각각의 응력수준별로 구할수 있다. 또한 탄소섬유쉬트 보강 시험체인 경우 표준편차 s는 0.905 이고, 형상변수 k는 1.417 이며, 특성치 u는 각각의 응력수준별로 구할수 있다. 표.2는 각응력수준별 특성치와 식.4에 의한 평균수명을 나타내었다.

실험결과와 확률해석에 의한 보강시험체의 회귀분석식과 피로강도는 표.3과 같다.

표.3 보강 시험체의 각 응력수준별 특성치와 평균수명

강판보강 시험체				탄소강유위트 보강 시험체			
k= 1.938 A=18.568 B=59.38				k= 1.417 A=15.438 B=327.87			
S	0.8	0.7	0.6	S	0.8	0.7	0.6
E(N)	4,469	53,337	933,471	E(N)	14,046	110,364	1,192,212
u	5,040	60,146	1,052,628	u	15,442	121,334	1,310,714

표.4 보강 재료별 실험과 확률해석에 의한 회귀분석식과 피로강도

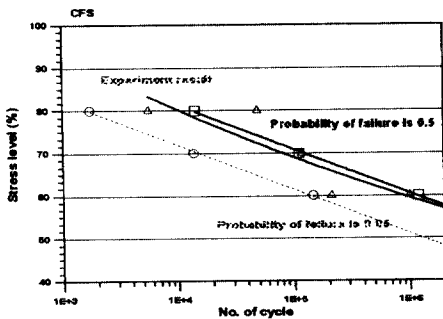
		회귀분석식	100만회에 대한 피로강도
강판 보강	실험값	$S = -0.0378747 \times \ln(N_f) + 1.11035$	58.74 %
	확률해석값	$S = -0.037377 \times \ln(N_f) + 1.11159$	59.52 %
CFS 보강	실험값	$S = -0.0451457 \times \ln(N_f) + 1.21596$	59.22 %
	확률해석값	$S = -0.0449556 \times \ln(N_f) + 1.22667$	60.57 %

표.4로부터 강판보강 시험체와 CFS보강 시험체의 반복회수 100만회에 대한 피로강도는 실험값과 50%확률 해석값과 거의 유사하다.

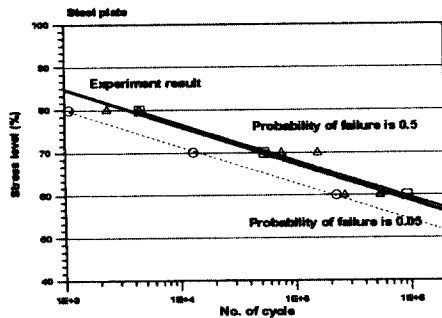
그림.4는 보강재료별 S-N-P 선도이며, 파괴확률 50%인 경우는 확률해석의 평균값이다. 실험과 파괴확률 5%에 대한 보강재료별 안전계수(Safety factor)는 표.5와 같다. 일반적으로 강재의 경우 응력수준에 대한 안전계수는 1.5에서 2.0 이상이며, 반복회수에 대한 안전계수는 10에서 20이상이다.³⁾ 해석결과 피로수명 100만회에 대한 강판 및 CFS의 응력수준 안전계수는 각각 1.08 및 1.16이며, 60% 응력수준에 대한 반복회수 안전계수는 각각 3.34 및 6.04이다.

표.5 보강재료별 안전계수

	임의의 응력수준 60%에 대한 반복회수의 안전계수	반복회수 100만회에 대한 응력수준의 안전계수
강판 보강	$X_n = \frac{N_{exp.}}{N_{5\%}} = \frac{716288}{214253} = 3.34$	$X_s = \frac{S_{exp.}}{S_{5\%}} = \frac{58.74}{54.24} = 1.08$
CFS 보강	$X_n = \frac{N_{exp.}}{N_{5\%}} = \frac{842243}{139516} = 6.04$	$X_s = \frac{S_{exp.}}{S_{5\%}} = \frac{59.22}{51.15} = 1.16$



a) CFS 보강 시험체



b) 강판 보강 시험체

그림.4 보강재료별 S-N-P 선도

3.2.3 Weibull 분포와 파괴 확률

그림.5는 응력수준 70%인 경우의 Weibull 분포와 누적분포함수 즉, 파괴확률을 나타 내고 있다. CFS 보강 시험체인 경우 피로수명의 분포가 넓게 퍼져있는 것으로부터, 피로수명예측은 강판보다 신뢰성이 떨어짐을 알 수 있다. 피로수명 100만회에서의 파괴확률은 강판 보강인 경우 약 95%이지만 CFS보강인 경우 약 55%인 것으로부터, 보강재를 CFS로 사용한 경우 보강효과가 우수함을 알 수 있다. 응력수준이 높을수록 피로수명에 대한 확률밀도함수는 강판보강재를 사용한 경우보다 CFS보강재를 사용한 경우가 신뢰도가 낮게 나타 났다.

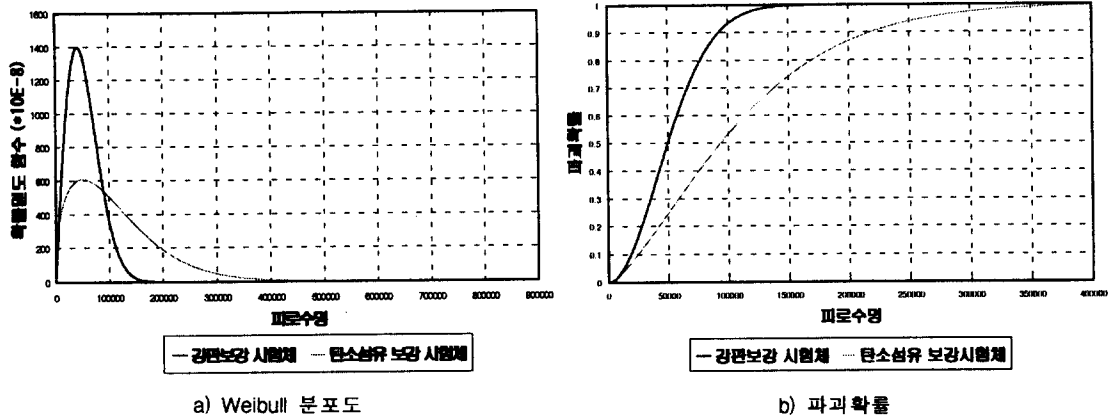


그림.5 응력수준 70%인 경우의 Weibull 분포와 파괴확률

4. 결론

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강판보강재를 사용한 경우는 보강재의 피로파괴로 인하여 시험체가 파괴 되었지만, CFS보강재를 사용한 경우는 보강재 접촉면의 균열진전에 의하여 시험체가 파괴되었다.
- 2) Weibull 분포에 의한 피로해석에서 응력수준이 높을수록 CFS 보강시험체는 강판보강 시험체에 비해 피로수명예측에 대한 신뢰성은 떨어지는 것으로 나타났다.
- 3) 보강재료별 안전계수는 CFS보강 시험체가 강판 보강 시험체보다 상대적으로 크게 나타났다.

참고문헌

- 1) Benjamin, J.R., and Cornell, C.A., "Probability, Statics, and Decicion for Civil Engineers", McGraw hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1970.
- 2) Collins, J.A., "Failure of Materials in Mechanical Design", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1981.
- 3) Norman E. Dowling, "Mechanical Behavior of Materials", Prentice hall, 1993