

강판 및 CFS로 보강된 R/C보의 피로거동 특성 비교연구

A Comparative Study on the Fatigue Behavior Characteristics of R/C Beams Strengthened with Steel Plate or Carbon Fiber Sheet

심종성*
Sim, Jong Sung

황의승**
Hwang, Eui Seung

배인환***
Bae, In Hwan

장상훈****
Jang, Sang Hoon

Abstract

The purpose of this study is to investigate the fatigue behavior of the reinforced concrete beams strengthened with steel plate and CFS(carbon fiber sheet). In this study, fatigue loads of 60 to 80 percent of the ultimate strength are applied to the specimens. From the results of test, the beams strengthened with steel plate show the flexural failure mode, while the specimens strengthened with CFS fail by separation between CFS and concrete surface. In case of the stress level of 70 %, strength degradations of the beams with steel plate and CFS in normalized flexural rigidity at 5,000 cycles is 24 and 28 percent, respectively.

1. 서 론

철근콘크리트 부재를 구성하고 있는 재료인 콘크리트 및 철근의 피로특성에 대한 연구는 많이 있으나, 복합재료로서의 철근콘크리트 부재의 피로거동 및 피로해석에 대한 연구는 미흡한 실정이며,⁽⁴⁾ 강판이나 탄소섬유 sheet(CFS)로 보강된 부재의 경우 피로거동 및 피로해석은 보다 더 복잡하다. 보강된 부재의 피로거동에 영향을 주는 요인은 접착제 물성, 두께, 보강길이 및 보강단면 그리고 접착방법

* 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 부교수

** 정희원, 경희대학교 토목공학과 조교수

*** 한양대학교 토목공학과 조교수

**** 한양대학교 토목공학과 석사과정

등이다. 본 연구에서는 현장에서 널리 적용되고 있는 강판보강공법과 신소재인 탄소섬유 sheet로 보강된 R/C보에 대한 피로거동을 비교, 고찰하기 위하여 실험변수별 제작된 보강시험체의 하중-변형을 관계로부터 컴플라이언스 변화량, 강성변화 등을 고찰하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험변수선정

본 연구에서는 보강시 사용된 보강재료 및 응력수준을 주요변수로 하였으며, 사용된 강판보강재는 SS41의 판재, 탄소섬유 sheet 보강재는 중탄성 탄소섬유 sheet이다. 보강방법은 강판을 보강할 경우에 에폭시 주입공법, 탄소섬유 sheet를 보강할 경우 에폭시 접착공법이 적용되었다. 보강길이는 1.9m로 일정하게 하였고, 보강두께는 강판보강재인 경우는 2.4mm이며 탄소섬유 sheet 보강재는 0.11mm(1층)로 일정하게 하였다. 또한 강판보강의 접착제 두께는 3mm spacer를 사용하여 일정하게 하였다.⁽³⁾

이와 같은 실험변수에 따라 제작된 시험체를 정리하면 표 1과 같다.

표 1 실험변수에 따른 시험체의 명칭

시험체 명칭	보강재료	보강방법	시험체 명칭	보강재료	보강방법
SP1-60	강판 (Steel Plate)	에폭시 주입공법	CF1-60	탄소섬유 sheet	에폭시 접착공법
SP2-60			CF2-60		
SP1-70			CF1-70		
SP2-70			CF2-70		
SP1-80			CF1-80		
SP2-80			CF2-80		

2.2 사용재료

2.2.1 콘크리트

본실험에서 사용된 콘크리트는 설계강도가 210kg/cm²로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 실험결과 220kg/cm²로 적절하게 나타났고 슬럼프값은 22cm로 나타났다.

2.2.2 철근 및 강판

시험체의 배근에 사용된 철근은 항복응력 4000kg/cm²인 D10, D13 철근과 항복응력인 5270kg/cm²인 SS41 강판이다

2.2.3 접착제

보강재를 부재에 부착하기위하여 강판보강 시험체는 EPX-3W, 탄소섬유 sheet 시험체는 FP-E3P를 사용하였다. 이들 접착제의 물성을 정리하면 표 2와 같다

표 2 적용된 접착제의 물성(단위 : kg/cm²)

단위 : kg/cm²

Type	인장강도	압축강도	휨강도	전단강도	탄성계수
EPX-3	> 200	> 700	> 400	> 150	> 10,000
FP-E3P	431	924	692	135	30,100

2.2.4 탄소섬유 sheet

본 실험에서 사용된 탄소섬유 sheet는 이형지 위에 형태유지의 목적으로 접착성이 있는 소량의 수지를 함침시킨 유리섬유 위에 탄소섬유를 배열시켜 만든 중탄성섬유 제품을 사용하였다. 이 제품의 물성은 표 3과 같다.

표 3 탄소섬유 sheet의 물성

Type	단위중량 (g/cm ³)	두께 (mm)	인장강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	파괴시 변형율
CF	1.82	0.11	35,500	2.35×10 ⁶	0.015

2.3 재하방법 및 측정방법

2.3.1 재하방법

피로시험은 MTS사의 50ton용량의 피로시험기를 사용하였으며, 시험시 하중재하속도는 2Hz의 속도로 시험체가 파괴될때까지 일정하게 재하하였다(그림 1). 재하시 반복횟수 10회까지는 정적으로 재하하였으며, 그 이후 주기적으로 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하면서 단진재하로 재하하였다. 피로하중의 반복회수에 따른 철근 및 보강재의 변형율, 변위, 그리고 보강시험체의 피로거동 및 균열진전상황을 측정하기 위하여 표 4과 같이 일정 반복회수에 대해서 피로시험기를 정지시킨 후 정적으로 최대하중(P_{max})까지 하중을 500kg씩 증가시키면서 육안, 변형게이지 및 변위측정기에 의해 시험체의 균열진전 상황, 반복회수에 따른 하중-처짐, 변형율 관계를 측정하였다.¹⁾ 재하하중은 파괴실험시 정적극한강도의 80%, 70%, 60%로 하였으며, 응력비(P_{min}/P_{max})는 0.1로 일정하게 하였다. 보의 파괴는 중앙부의 처짐이 30mm일때 보가 파괴된 것으로 간주하였다. 시험체의 피로하중 크기는 표 5와 같다.

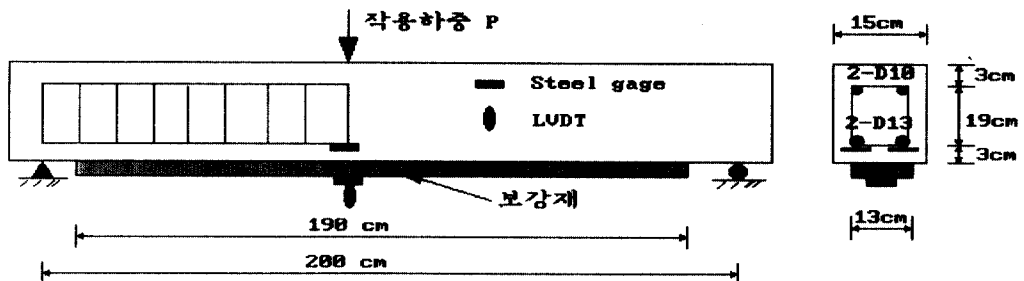


그림 1 피로시험 재하방법

그림 2 측정 반복회수

측정일련번호	1	2	3	4	5	6	7	8
하중반복회수	1	10	1,000	5,000	10,000	20,000	40,000	60,000
측정일련번호	9	10	11	12	13	14	15	16
하중반복회수	80,000	100,000	150,000	200,000	250,000	300,000	350,000	400,000
측정일련번호	17	18	19	20	21	22	23	24
하중반복회수	450,000	500,000	550,000	600,000	650,000	700,000	750,000	800,000

표 5 시험체별 피로하중 크기 (단위 : ton)

시험체명	최대하중 (P_{max})	최소하중 (P_{min})	정적최대 하중
CF1-60	3.9	0.4	6.5
CF2-60			
CF1-70	4.4	0.45	
CF2-70			
CF1-80	5.0	0.5	
CF2-80			
SP1-60	5.4	0.55	9
SP2-60			
SP1-70	6.3	0.63	
SP2-70			
SP1-80	7.2	0.7	
SP2-80			

2.3.2 측정방법

시험체의 피로거동을 평가하기 위하여 하중단계별로 하중-중양부의 처짐량을 측정하였다. 측정기기는 LVDT(변위계)를 사용하였고, 측정위치는 각 시험체의 지간 중앙의 시험체 하단면으로 하였다. 인장철근의 변형은 그림 2.2에서 나타난 것과 같이, 전기적 변형게이지를 주철근의 하부면에 부착하여 반복회수 따라 측정하였다. 철근의 변형게이지 부착위치는 최대 휨모멘트 지점인 지간 중앙이며, 2개를 부착하였다. 보강재의 변형도를 측정하기 위하여 보강재 하부중앙에 변형게이지를 부착하였다. 시험체의 게이지 부착위치 및 피로시험의 개략도는 그림 2.2 과 같다. 하중, 중앙점변위, 재료의 변형도는 시험체에서 얻어진 아날로그 신호를 사용자의 의도에 따라 초당 얻고싶은 데이터의 갯수를 정하여 이를 디지털 데이터로 바꾸어 저장하는 DAS-ON(Data Acquisition System)을 사용하여 측정값들을 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열 및 파괴양상

강판보강 시험체의 피로파괴양상은 응력수준과 관계없이 보강재의 중앙부에서 보강재에 발생된 피

로균열이 성장하여 보강재가 파괴된후 부재가 파괴되었으며, 강판보강 시험체에서는 모체와 보강재와의 접착에 대한 문제는 발생하지 않았다(사진 1).

탄소섬유 sheet 보강시험체의 피로파괴양상은 강판보강 시험체와는 달리 단부에서 보강재가 모체 콘크리트에서 떨어져나가면서 파괴되는 양상을 보였다. 대부분의 탄소섬유 sheet 보강시험체에서 보강재가 박탈될 때 보강재 표면에 콘크리트가 거의 붙어있지 않고 깨끗하였는데, 이는 에폭시 접착제의 휨강도 등 기본성능이 떨어지거나, 접착제의 두께가 충분하지 않은 것으로 판단된다(사진 2).

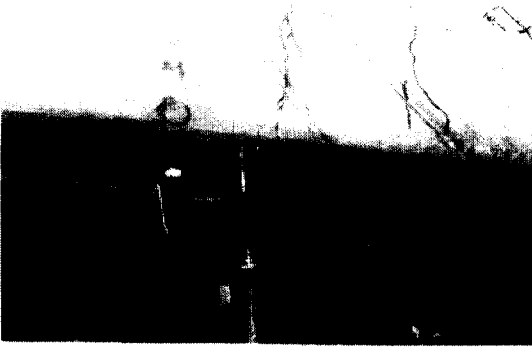


사진 1 강판보강 시험체의 피로파괴양상



사진 2 탄소섬유sheet 보강시험체의 피로파괴양상

3.2 하중-중앙최대처짐관계

보강시험체별 하중-최대처짐관계는 그림 3, 4와 같다. 강판보강의 경우 응력수준 70%에서는 회수가 증가하는 동안 중앙부위의 처짐도 계속 증가하는 경향을 나타내며, 각각의 응력수준별로 피로하중 재하 초기에 처짐이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 무보강시험체의 정적파괴하중($5.5t_{cm}$) 정도인 응력수준 60% 경우 부재가 파괴되기 전까지 강성의 저하없이 일정한 처짐값을 보였다. 탄소섬유 sheet 보강의 경우 강판보강에 비해 반복회수 초기에 처짐이 크게 나타났지만, 지속적인 증가는 없었다. 응력수준 70%의 경우 파괴시 처짐에 대한 임의 반복회수에서의 처짐의 비(D/D_f)와 파괴회수에 대한 임의 반복회수에 대한 비(N/N_f)의 관계는 그림 5과 같다.⁽²⁾ 그림 3.2.3으로부터 파괴시 까지의

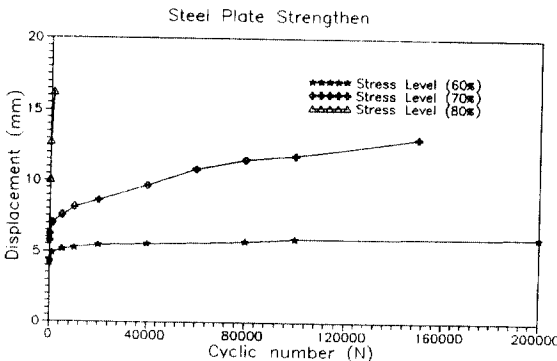


그림 3 응력수준별 하중-최대처짐(강판보강)

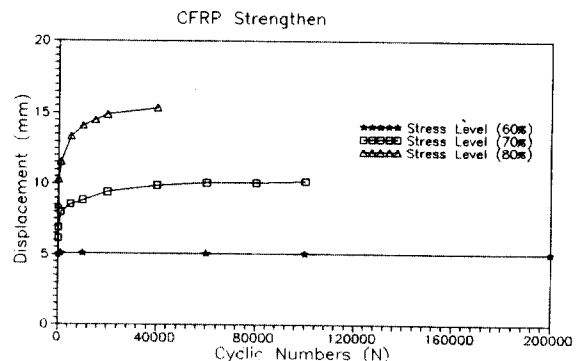


그림 4 응력수준별 하중-최대처짐(탄소섬유 sheet 보강)

처짐관계를 보강재의 종류에 따라 비교하면, 탄소섬유 sheet 보강의 경우 파괴회수의 약 10%에서 파괴시의 약 85%의 처짐을 나타내었다. 강판보강의 경우 파괴회수의 50% 정도에서 파괴시의 85% 처짐을 보였으며, 탄소섬유 sheet 보다 안정적인 균열 성장을 보였다.

3.3 반복회수에 따른 컴플라이언스

컴플라이언스는 균열을 갖는 시험편에 대하여 정의되는 값으로 균열길이의 함수이다. 즉 균열의 길이가 커질수록 시험편의 강성은 낮아져 변형하기 쉬우므로 컴플라이언스는 증가한다.⁽⁵⁾ 그림 6과 7는 각 보강재별에 대한 반복회수별 컴플라이언스 변화를 나타낸 것이다.

탄소섬유 sheet 보강시험체의 경우 강판보강 시험체와 비교하면 초기의 컴플라이언스 감소가 없고 지속적인 증가를 나타낸다. 탄소섬유 sheet 보강시험체는 강판보강 시험체에 비하여 상대적으로 보강된 단면의 강성이 작기 때문에 컴플라이언스 양이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

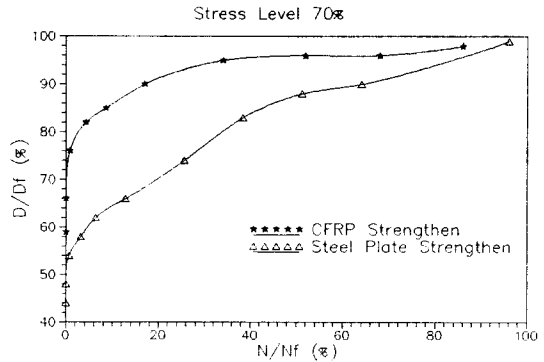


그림 3 응력수준 70%에서 파괴시 반복회수에 대한 반복회수의비와 파괴시 처짐에 대한 처짐의 비 관계

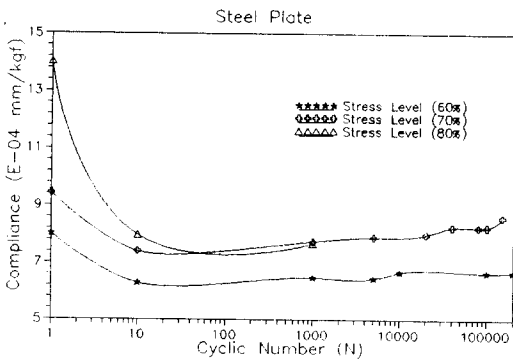


그림 6 응력수준별 컴플라이언스(강판보강)

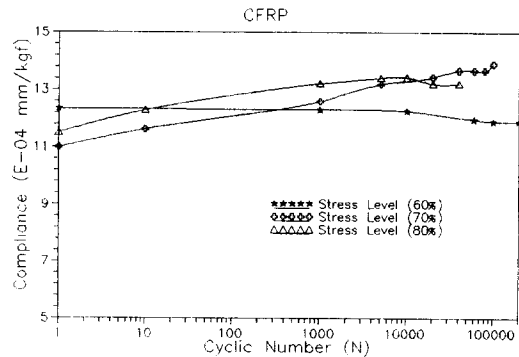


그림 7 응력수준별 컴플라이언스(탄소섬유 sheet 보강)

3.4 강성변화

제작된 시험체가 탄성거동을 한다고 가정하고 초기 강성에 대한 반복회수별 강성의변화를 응력수준 70%에 대하여 그림 8과 같이 나타내었다. 5,000회에서 강판보강시험체의 강성은 24% 저하되었고, 탄소섬유 sheet 보강시험체는 28% 저하되었다. 그림 9는 반복회수에 따른 보강재의 변형율을 나타내었다. 실험에 사용한 strain gage는 까지 측정가능하다. 강판보강재의 항복변형율은 이다. 그림 9로부터 강판보강시험체는 반복회수 5,000회 정도에서 강판이 항복변형율에 접근하였으므로 그림 8에서 처럼 반복회수 5,000회 이상에서는 강성이 현저히 저하됨을 알 수 있다.

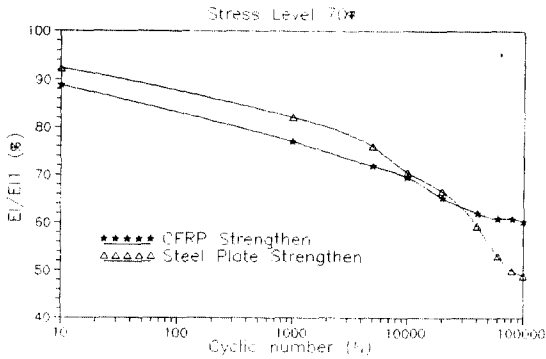


그림 8 보강재료에 따른 강성변화

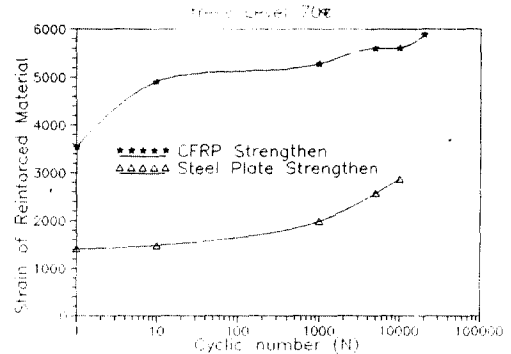


그림 9 보강재의 변형률

4. 결 론

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 응력수준에 관계없이 강판보강 시험체는 휨파괴양상을 나타내었다. 그렇지만, 탄소섬유 sheet 보강시험체는 보강재단부에서 bonding failure가 발생하여 보강재가 박탈된 후 부재가 파괴되었다.
- 2) 파괴시까지 균열성장과 관련한 컴플라이언스의 변화량 고찰결과, 같은 응력수준에서 반복회수에 따른 컴플라이언스의 변화량은 강판보강 시험체보다 탄소섬유 sheet 보강 시험체에서 보다 적게 나타났다.
- 3) 초기강성에 대한 임의 반복회수의 강성비에 대한 고찰결과, 강판보강 및 탄소섬유 sheet 보강 시험체의 5,000회에서의 강성저하는 각각 24%와 28%로서 유사하였으나, 강판보강 시험체에서는 5,000회 이후 급격한 강성저하를 나타내었다.
- 4) 피로하중하에서 탄소섬유 sheet 보강시 보강단부에서의 bonding failure방지를 위한 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

1. Shah, S.P., and Chandra, S., "Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading", Journal of ACI, Vol. 67, No. 10, Oct., 1970, pp.816-824.
2. J. M. Lovegrove and Salah El Din, "Deflection and Cracking of Reinforced Concrete Under Repeated Loading and Fatigue", SP-75, American Concrete Institute, Detroit, 1982., pp.133-152
3. ACI Committe 215, "Consideration for Design of Concrete Structures Subject to Fatigue Loading", 1986., pp.215R-1-215R-25
4. 심종성 외 4명, "유기 및 무기재료로 보수된 R/C보의 동적거동 특성 비교", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회집, 제7권, 제2호, 1995.11., pp.350-354
5. 심종성 외 2명, "손상된 R/C보의 보강후 피로거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제16권, 제 1-2호, 1996. 3., pp.135-142