

CFRP Plate로 보강된 철근콘크리트 보의 정적 및 피로 거동 특성

Static and Fatigue Behavior Characteristics of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Plate

김 광 수* 김 진 율** 김 성 후*** 박 선 규***
Kim, Kwang-Soo Kim, Jin-Yul Kim, Sung-Hu Park, Sun-Kyu

Abstract

In the recent construction industry, Carbon Fiber Reinforced Polymers(CFRPs) have been highly considered as innovative strengthening materials for civil structures due to their superior material properties. This paper is to offer design data and strengthening efficiency of reinforced concrete beams strengthened with CFRP Plate. Static tests were carried out to evaluate failure modes and strengthening capacity. Displacements and strains of steel and CFRP plates were obtained and analyzed through a series of fatigue tests. Also, Those evaluated the energy dissipation. Results of the tests showed increase in strengthening ratios caused debonding failure at the end of beams. For the beams wrapped with CFRP sheets around the end of the plates, debonding failure mode that was induced from flexural cracks was indicated. Through the fatigue tests, it was observed that displacements, strains of steel and CFRP plates converged into certain values. It is also proved that the beams strengthened with CFRP plates are able to resist fatigue loading under serviceability.

요 지

최근 건설 산업에서 CFRP는 재료적 장점들 때문에 구조물의 보강재로서 많이 사용되어 지고 있다. 본 논문에서 CFRP Plate가 보강된 철근콘크리트 보의 보강 효율과 설계 기초자료를 제공하려 한다. 정적 실험은 실험체의 파괴양상, 보강성능을 평가하였으며, 피로 실험은 처짐, 철근 변형률, CFRP Plate의 변형률을 분석하고, 에너지 소산과 보강성능을 평가하였다. 실험한 결과, 보강량이 증가할수록 단부 박리 파괴를 일으켰다. 그리고, 단부를 보강한 경우는 휨균열로 인한 박리파괴를 나타내는 파괴양상을 보였다. 피로 실험을 통하여 일정한 반복하중 횟수가 되면 처짐, 철근 변형률, CFRP Plate의 변형률 값이 일정한 값으로 수렴하였다. CFRP Plate가 보강된 보의 피로하중에 대해 사용성 확보가 가능했다.

Keywords : CFRP, Fatigue, Strengthening

핵심 용어 : 탄소섬유, 피로, 보강

* 정희원, 성균관대학교 과학기술연구소 책임연구원

** 정희원, (주)AMI 기술연구소 주임연구원

*** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정

**** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

E-mail : whitesky@skku.edu 018-361-5621

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 경제성과 내구성이 우수하며, 또한 내화성이 좋고 구조물의 형상과 크기에 크게 제약을 받지 않아 현재까지도 가장 많이 사용되어지는 구조이다. 그러나, 시공 중의 설계변경 및 시공불량, 구조물의 완공 후의 용도변경에 따른 외력의 증가, 구조물 주위의 환경변화, 시간의 경과에 따른 재료의 물성변화 등 계획, 설계 및 시공 중에 예측하지 못한 여러 가지 요소에 의해 손상을 입게 된다. 따라서, 철근콘크리트 구조물은 계획 단계에서부터 완공까지 철저한 관리가 필요할 뿐만 아니라 완성 후에도 정기적인 점검을 실시하여 구조물의 노화현상, 즉 성능저하 정도를 파악하고 적절한 시기에 유지관리가 절대적으로 필요하다.

이러한 성능 저하된 콘크리트 구조물을 보강하는 방법으로 초기에 강판보강공법에서 외부프리스트레싱공법으로 발전하였으며, 최근에는 복합섬유(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)부착공법이 적용되고 있다. 최근 각광받고 있는 FRP에 의한 보강공법은 재료 자체의 고강도, 높은 강도/중량비, 피로 및 부식에 대한 높은 저항성 등의 특징을 지니고 있다. 철근콘크리트 보에 강판 혹은 FRP로 보강했을 때 강도와 강성이 증가하는 효과가 있지만 기존 철근콘크리트 보의 파괴와는 다른 콘크리트와 보강재의 계면에서의 탈락(delamination)과 인장철근 층에서의 콘크리트 덮개를 물고 떨어지는 단락(rip-off), 국부전단균열에 의한 계면전단파괴(peeling off) 등 박리(debonding)에 의한 파괴이며, 이는 취성적인 파괴를 유발하여 복합섬유로 보강된 철근콘크리트 보를 완전부착으로 가정했을 때의 이론적인 강도보다 더 작은 강도에서 갑작스러운 조기 파괴가 발생하게 되는 단점을 지니 피로거동에 대한 검증이 필요한 실정이다.^(1,2)

본 연구에서는 일반적으로 많이 시공되는 탄소섬유 보강 복합재 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 이하 CFRP) Plate 단순부착공법에 대해 정적 및 피로실험을 통하여 보강효과 및 계면 특성을 파악하고 피로거동을 파악함으로써 철근콘크리트 구조물의 보강

설계 시 기초자료로 활용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

2. 본 문

2.1 실험체의 형상 및 실험 변수

실험체의 단면치수는 200×300mm로 인장측과 압축측 피복두께를 30mm로 하였으며, 지점간 거리를 2.4m, 전체 실험체 길이는 2.7m로 제작하였다. 철근콘크리트 보에서 인장철근의 단면적이 압축철근 단면적보다 큰 것이 정상이나, 본 실험에서는 CFRP Plate 보강으로 인한 콘크리트 연단에서의 압축파괴를 방지하고, 보강성능 차이의 변별력을 높이기 위하여 압축철근을 H13, 인장철근으로는 H10을 배근하였다. 또한, 전단 보강철근은 H10을 100mm 간격으로 배근 하였으며 전체적인 실험체의 형상은 Fig.1과 같다.^{(3),(6),(9)} 실험체의 경우는 정적 실험 7개와 피로 실험 4개를 제작 하였다.

정적 실험의 실험체는 7개로 Table 1에서 보는 바와 같이 기준 실험체인 표준 실험체는 CFRP를 보강하지 않은 순수 철근콘크리트 부재이며, 보강실험체는 국내 S사에서 제작되고 폭 50mm인 CFRP Plate를 사용하였다. 시간의 60%를 고려한 경우는 CFRP Plate를 1매 보강 실험체 그리고, 1매 보강 후 단부를 Sheet로 감싼 실험체로 제작하였다. 또, 90%를 고려한 경우는 겹으로 1겹 보강한 실험체 및 폭 방향으로

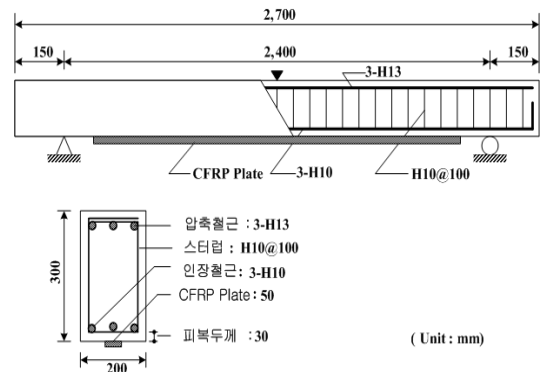


Fig. 1 실험체 형상

Table 1 정적 실험의 실험변수

실험체명	보강길이	보강접수	비 고
SNF	-	-	표준 실험체
SFP60-1	1.44m	1겹 보강	지간의 60% 고려
SFP60-2		단부 Sheet 감싸기	
SFP90-1	2.16m	1겹 보강	지간의 90% 고려
SFP90-2		폭 2겹 보강	
SFP90-3		층 2겹 보강	
SFP90-4		층 3겹 보강	

Table 2 피로 실험의 실험변수

실험체명	보강길이	보강접수	비 고
SNF	-	-	표준 실험체
FSS90-1	2.16m	1겹 보강	지간의 90% 고려
FSS90-2		폭 2겹 보강	
FSS90-3		단부 Sheet 감싸기	

2겹, 층 방향으로 2겹, 3겹 보강한 실험체를 제작하였다. 피로 실험체는 4개로 정적 실험에서 우수인자를 고려하여 Table 2에서 보는 바와 같이 표준 실험체 1개와 CFRP Plate를 전지간의 90%를 고려하여 1매 보강한 실험체와 그리고 단부를 감싼 실험체, 보 하면에 폭 방향으로 2매 보강한 실험체를 제작하였다.^(5,7,8)

2.2 사용 재료

2.2.1 콘크리트

실험체 제작에 사용된 설계기준강도 24MPa의 콘크리트 배합표는 Table 3과 같으며, 레미콘 타설시 $\Phi 100 \times 200$ 압축강도 시험용 원주공시체를 취득하여 KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험방법)에 의하여 채령 28일에 각각 3개씩 압축강도시험을 실시하여 평

Table 3 콘크리트 배합표

시멘트 (kg/m ³)	물 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)	굵은 골재 (kg/m ³)	혼화제 (kg/m ³)	물-시멘트 트비 (%)	잔골재율 (%)
328	164	850	954	1.64	50	47.6

Table 4 콘크리트의 재료적 성질

설계기준강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
24	26.7	2.16×10^4

Table 5 철근의 재료적 성질

종류	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
H10	457.2	766.3	2.01×10^5
H13	466.2	679.3	2.11×10^5

Table 6 CFRP Plate의 재료적 성질

종류	두께 (mm)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
CFRP Plate	1.2	2942	1.47×10^5

균값을 구하였다. 재료 시험결과를 나타낸 것은 Table 4와 같다.

2.2.2 철근

본 실험에서 사용된 철근의 재료시험 결과를 이용하여 구한 항복강도와 탄성계수는 Table 5와 같다.

2.2.3 CFRP

보강재로 사용된 CFRP Plate는 국내 S사에서 제작된 1방향 CFRP Plate를 사용하였으며, S사가 제시하는 CFRP Plate의 재료적 성질은 Table 6과 같다.

2.3 실험방법

CFRP Plate의 정적 실험을 위하여 1000kN 용량의 UTM으로 3점 채하 하였다(Fig. 2). 보강된 실험

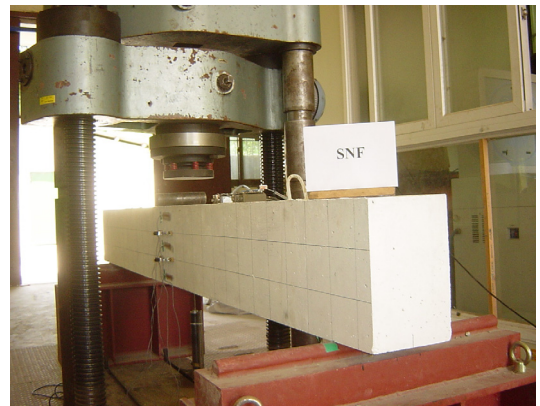


Fig. 2 정적 실험의 전경

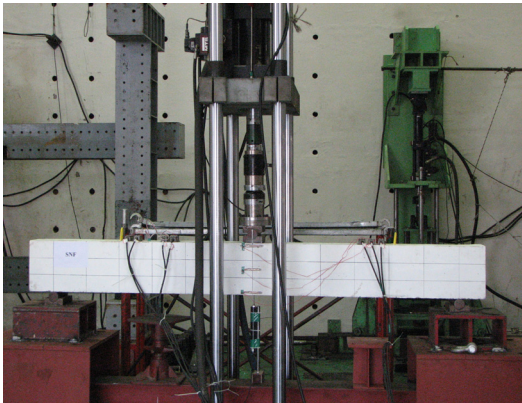


Fig. 3 피로 실험의 전경

체에서의 압축철근, 인장철근 및 CFRP의 변형률을 측정하기 위하여 하중이 작용하는 중앙부에 각각 2개씩의 스트레인게이지를 부착하였으며, 보강된 CFRP Plate의 길이방향에 대한 변형률분포의 변화를 파악하기 위하여 스트레인게이지를 150mm 간격으로 부착하였다.

그리고, 피로 실험의 경우는 250kN 용량의 UTM으로 3점 재하 하였다(Fig. 3). 피로 하중은 정적 실험을 통하여 획득된 각 실험체들의 인장철근이 항복하는 값을 토대로 하여 25kN을 산정하였으며, 25kN으로 재하(loading) 및 재하(unloading)를 실시하여 반복하중을 가력 하였다. 2Hz 주기로 최대 20만회까지 가력하여 반복횟수에 따른 탄성회복정도를 측정하고, 20만회 반복재하 후 정적재하를 하여 파괴할 때까지 측정하였다. 정적 실험과 동일하게 변위계(LVDT)와 변형률 게이지를 동일 위치에 부착하고 설치하였다. 이렇게 설치한 센서로부터 나오는 데이터는 EDX-1500A(데이터 로거)로 획득하고, 컴퓨터를 이용하여 데이터를 정리하였다.

3. 실험 결과

3.1 정적 실험 결과

3.1.1 보강길이에 의한 영향

Fig. 4에서 CFRP Plate를 지간길이 60%와 90%

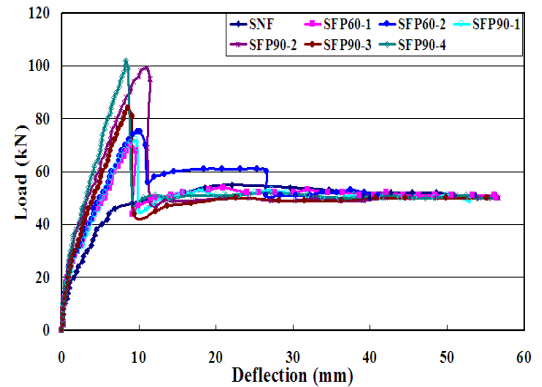


Fig. 4 CFRP Plate의 하중-처짐 곡선

로 1매 보강된 각 실험체의 파괴 시까지 하중-처짐 곡선을 보면 보강길이에 따른 보강성능의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있었고, Plate의 박리와 동시에 최대내력이 저하된 후 표준 실험체와 같은 거동을 나타내었다.

3.1.2 보강량에 의한 영향

CFRP Plate로 보강된 실험체는 보강겹수에 따라 1매 보강한 실험체(SFP90-1) 보다는 폭으로 2매 보강한 실험체(SFP90-2)가 약 38%정도의 하중증가가 나타났지만, 층으로 2매 보강한 실험체(SFP90-3)는 SFP90-1 보다 약 18%정도, 층으로 3매 보강한 실험체(SFP90-4)는 약 42%의 하중증가현상이 나타나, 효율적인 면에서 층으로 보강한 형태보다는 폭으로 보강한 형태가 보강효율이 더 좋은 것으로 나타났다.

3.1.3 보강방법에 의한 영향

단순 1매 보강한 실험체(SFP60-1) 보다는 단부의 박리파괴를 방지하기 위하여 CFRP Sheet로 보강하여 감싼 실험체(SFP60-2)가 약 8%정도의 하중증가가 발생하였고, 박리시의 처짐도 증가하는 것으로 측정되었다. SFP60-1은 갑작스럽게 박리가 진행되어 표준 실험체(SNF)와 같은 거동을 하지만, SFP60-2는 Fig. 4에서 보는 것처럼 박리가 두 번에 걸쳐 진행되어 SFP60-1 보다는 연성적인 거동을 하는 것으로 판단된다.



Fig. 5 파괴 양상

3.1.4 CFRP Plate의 변형률

CFRP Plate를 지간길이 60%로 1매 보강한 실험체(SFP60-1)에서는 박리파괴 발생 시 보강재의 변형률은 약 $3.933\mu\epsilon$ 이며, 지간길이 90%로 1매 보강한 실험체(SFP90-1)는 박리파괴 시 보강재의 박리변형률을 약 $4.787\mu\epsilon$ 로 나타냈다. 이러한 이유는 부착면적의 증가가 박리파괴를 지연시켰고, 다른 실험체 보다 많은 변형률이 발생하였지만, 보강재의 극한 변형률의 약 40%정도 밖에 되지 않아 기존의 단순한 CFRP 부착보강공법은 재료의 특성을 최대한 이용하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고, 보강겹수, 보강량이 증가함에 따라 박리파괴 시 보강재의 박리변형률은 급격히 감소하는 것으로 나타나 기존의 단순부착보강공법은 보강량이 증가할수록 보강효율이 많이 감소하는 것으로 판단된다.

3.1.5 파괴 양상

최종 파괴 양상은 Fig. 5와 같다. CFRP Plate를 지간의 60%로 보강하고 단부를 Sheet로 감싼 실험체(SFP60-2), 지간의 90%로 1매 부착한 실험체(SFP90-1)와 폭으로 2매 보강한 실험체(SFP90-2)

에서는 모두 철근콘크리트 보의 중앙부 하단에서 휨 균열이 발생하였고, 이것으로 인해 최초 CFRP Plate와 콘크리트 계면에서의 박리가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 결국 중앙부에서 발생한 박리는 단부로 진행되어지면서 최종박리 파괴로 이어졌다.

그러나, 지간 60%로 보강한 실험체(SFP60-1)와 지간 90% 고려한 총 2매와 3매로 보강한 실험체들(SFP90-3, SFP90-4)은 초기 박리현상이 발생한 이후 급작스런 단부로의 박리 진행이 발생되면서 매우 취성적인 파괴양상을 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 보강재인 CFRP Plate 길이가 짧아지면 지간 전체에 걸쳐 보강효과를 발휘하지 못하였고, 보강재가 겹으로 보강되면서 보강재의 휨 강성이 증가되어 단부에서부터 취성적인 박리가 발생한 것으로 판단된다.⁽²⁾⁽³⁾

3.2 피로 실험 결과

3.2.1 처짐

Fig. 6은 피로 실험체들의 하중반복 횟수와 처짐의 관계를 나타낸 것이다. 전체적으로 초기에서 1,000번

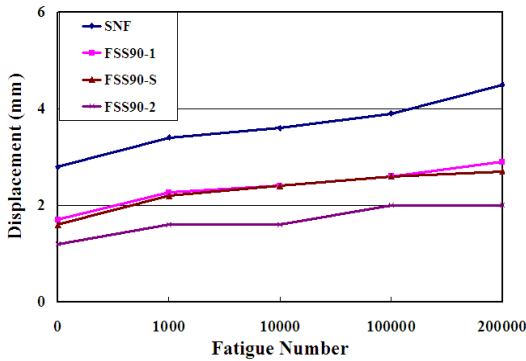


Fig. 6 하중반복 횟수에 따른 실험체별 처짐 관계

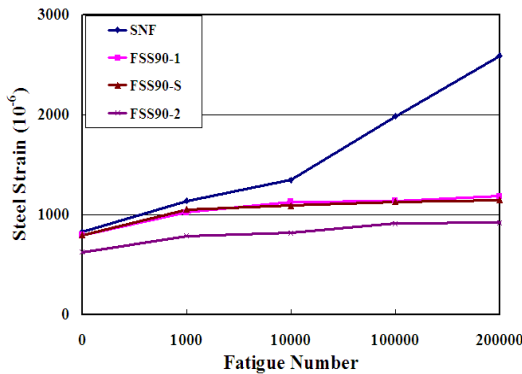


Fig. 7 하중반복 횟수에 따른 실험체별 주철근 변형률 관계

의 반복하중에서 처짐이 증가하는 경향을 보인다. 그리고, 표준 실험체(SNF)의 경우는 반복 횟수가 증가할수록 처짐이 증가하며, 피로반복 횟수가 100,000번 이후에는 처짐의 증가량이 많이 발생하는 반면에, CFRP Plate를 보강한 실험체(FSS90-1, FSS90-S, FSS90-2)의 경우는 100,000번 이후에 처짐이 일정하거나 증가량이 SNF에 비해 작음을 알 수 있다. 피로에 대하여 SNF의 경우는 안정적이지 못하지만, FSS90-1, FSS90-S, FSS90-2의 보강된 실험체들은 반복하중이 증가해도 일정한 처짐으로 수렴하는 것으로 보아 피로에 대해 우수하다고 판단되어진다.

3.2.2 주철근 변형률

Fig. 7은 피로하중 횟수와 중앙부 주철근의 변형률 관계를 나타내고 있다. 표준 실험체(SNF)는 전체적으

로 증가하는 경향을 나타내는데, 10,000이후부터 변형률이 많이 증가하여 100,000번 이후에 철근의 변형률 값이 2000 $\mu\epsilon$ 을 넘어 항복하는 것을 볼 수 있었다. 하지만, 보강한 실험체(FSS90-1, FSS90-S, FSS90-2)의 경우는 1000번 이후부터 일정한 변형률을 유지하는 것으로 보아 피로에 대하여 우수한 것으로 판단되어 진다. 그리고, 보강형태가 다른 단부를 감싼 FSS90-S 실험체와 단순 부착한 FSS90-1 실험체의 주철근 변형률 거동은 비슷한 것으로 나타났다. 보강량 측면에서, 1겹을 보강한 실험체(FSS90-1)와 폭으로 2겹 보강한 실험체(FSS90-2)를 살펴보면 FSS90-2가 피로반복 횟수가 증가할수록 작은 주철근 변형률을 나타내어 피로에 대하여 FSS90-1보다 우수한 것으로 나타났다.

3.2.3 CFRP Plate 변형률

Fig. 8은 CFRP Plate가 보강된 실험체들 대상으로 하중반복 횟수와 중앙부 탄소섬유의 변형률 관계를 나타내고 있다. CFRP Plate가 한 겹 보강되고, 단순 부착한 FSS90-1과 단부를 보강한 FSS90-S을 보면 전체적인 탄소섬유의 변형률이 초기에는 FSS90-1 실험체가 보다 높은 응력 분포를 보였지만, 100,000번의 반복하중을 받은 이후에 같은 값으로 수렴하는 것을 볼 수가 있다. 그리고 Plate를 폭으로 2겹 보강한 FSS90-2 실험체는 1000번 이후부터 거의 변화 없이 일정한 변형률을 유지하는 것으로 보아 피로에 대하여 우수한 것으로 판단되어 진다.

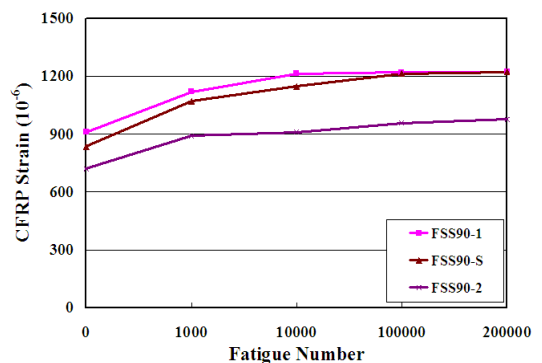


Fig. 8 하중반복 횟수에 따른 보강 실험체별 CFRP Plate 변형률 관계

3.2.4 피로 실험 후 정적 파괴 거동

피로를 위한 반복하중 이후의 정적재하를 수행하여 정적하중과 처짐과의 관계를 다음의 Fig. 9에 나타내었다. 실험결과를 살펴보면 표준실험체의 경우는 100,000번 반복재하 후 인장철근이 항복하였고 200,000번 재하 후에는 인장철근의 변형률이 지속적으로 증가하는 거동을 나타내었으며, 이는 표준실험체의 경우 사용하중 상태에서 피로의 누적에 의한 구조체의 항복이 발행할 수 있음을 의미한다. CFRP로 보강된 실험체의 경우는 최종 반복하중 재하 후에도 철근이나 CFRP Plate의 변형이 항복하지 않고 반복횟수가 증가하더라도 변형률의 증가폭이 크지 않고 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.5 에너지 소산(energy dissipation)

에너지 소산은 균열의 발생, 성장, 균열폭의 증가, 영구변형 등에 기인하며, 구조물의 손상정도를 파악할 수 있다. 이러한 에너지 소산은 하중-처짐 관계의 그

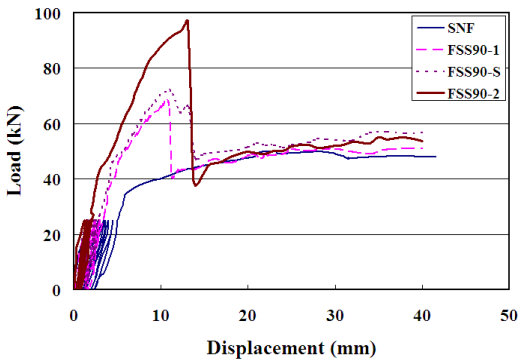


Fig. 9 피로 후 정적 파괴 거동

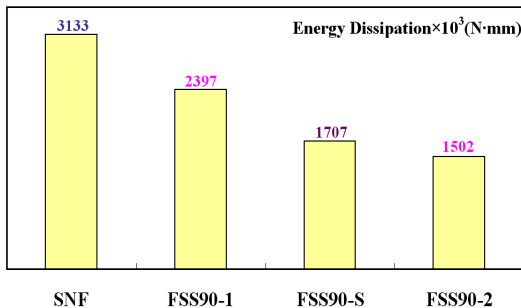


Fig. 10 피로 실험체별 에너지 소산량

래프에서 나타난 그래프의 둘러싸인 부분을 적분하여 구할 수 있다. 피로와 같은 반복하중을 받는 경우 폐합된 그래프의 면적은 반복하중의 횟수가 증가수록 면적은 감소하는 것이 일반적이다.⁽⁴⁾ 이러한 에너지 소산량에 대해 표준 실험체와 CFRP Plate로 보강한 실험체를 대상으로 비교하여 보았다.

표준 실험체는 반복하중의 재하가 1,000번 이후부터 100,000번 까지 계속해서 변형이 발생하여 철근이 항복하면서 균열의 급격한 증가 등으로 인해 에너지 소산량이 증가하는 것을 확인 할 수가 있었다. 그리고, CFRP Plate가 보강된 FSS90-1, FSS90-S, FSS90-2의 실험체들은 10,000번 이후부터 균열의 발생이나 구조물의 손상이 발생되지 않아 에너지 소산량이 적음을 알 수가 있었다. 그리고, 보강량의 증가나 보강방법이 개선이 이루어질수록 에너지 소산량이 적음을 알 수가 있었다.

4. 결 론

하면에 CFRP Plate를 단순 부착한 철근콘크리트 보의 정적 및 피로 거동에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) CFRP Plate를 Sheet로 감싼 경우는 극한하중과 연성을 증가시켰으며, CFRP Plate를 겹 보강하는 것보다 부착면적을 크게 폭 보강하는 것이 더 효율적이었다.
- 2) SFP60-2와 SFP90-1는 중앙부에서 휨 균열이 발생한 후, CFRP Plate의 박리로 인해 파괴가 발생하였고, 그 외 실험체들은 단부에서 최초 박리가 발생하여 중앙부로 전이되는 박리 파괴가 발생하여 매우 취약적인 파괴 양상이 나타났다. 이러한 파괴 양상의 차이는 CFRP Plate의 부착길이에 따른 차이와 단부에서 충분한 부착길이의 확보 유·무에 기인한다고 판단된다.
- 3) 피로 실험결과 SNF는 사용하중 상태에서 반복하중이 증가함에 따라 철근이 항복하고 변형이 급격히 증가하는 등 피로누적에 대한 영향으로 피로에 대한 안전성을 확보하고 있지 못하였으나, SNF에 비해 상대적으로 보강 실험체들은 반복하중이 증가하더라도 피로누적에 의한 변형의 증가양상이

작았으며, 하중 횟수의 증가에 따라 작은 증가 또는 수렴하여, 단순부착공법은 SNF에 비하여 상대적으로 피로에 대하여 우수한 성능을 갖고 있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 지정 R&D(05 기반구축 D04-01) 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 고병순, 탄소섬유판으로 외부 부착 보강된 철근 콘크리트보의 거동 특성, 성균관대학교, 석사학위논문, 2004.
2. 김진울, CFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 정적 및 피로 거동, 성균관대학교, 석사학위논문, 2006.
3. 김진울, 김광수, 박선규, 이영재, "CFRP가 보강된 철근콘크리트 보의 거동과 연성", 한국콘크리트학회 논문집, 제19권, 제2호, 2007, pp. 225-231.
4. 박정용, 김성도, 조백순, 정진환, "단조 반복하중 하의 탄소섬유시트 보강 RC보의 거동에 관한 연구", 한국구조물진단학회, 제10권, 제4호, 2006, pp. 183-193.
5. 김정섭, 조창호, 박영배, 조철희, "철근콘크리트 보의 탄소섬유시트 보강에 따른 피로거동에 관한 실험적 연구," 대한건축학회 논문집, 제 18권 제 12호, 2002, pp. 19-26.
6. Arduini, M. and Nanni, A., "Parametric Study of Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement", ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 4, 1997, pp. 493-501.
7. Heffernan, P. J. and Erki, M. A., "Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates", Journal of Composites for Construction, Vol. 8, No. 2, 2004, pp. 132-140.
8. Rteil, Ahmad A. and Soudki, Khaed A., "Preliminary experimental investigation of the fatigue bond behavior of CFRP confined RC beams", Construction and Building Materials, Vol. 21, No. 4, 2007, pp. 746-755.
9. Toutanji, H., Zhao, L. and Zhang, Y., "Flexural Behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix", Engineering Structures, Vol. 28, No. 4, 2006, pp. 557-566.

(접수일자 : 2007년 10월 30일)

(심사완료일자 : 2008년 4월 11일)