

탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 피로내구성 향상에 관한 연구

Improvement in Fatigue Durability of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets

박 정 용* 김 성 도** 조 백 순*** 김 인 태**** 정 진 환*****
Park, Jeong-Yong Kim, Seong-Do Cho, Baik-Soon Kim, In-Tae Cheung, Jin-Hwan

Abstract

In recent investigations, reinforced concrete beams strengthened with Carbon Fiber Sheets (CFS) subjected to fatigue loading were reported to be failed at the ends of CFS by its debonding. U-shaped CFS were attached to both ends of the CFS when fatigue tests on strengthened beams were conducted to delay and/or prevent fatigue failures of adhesive interface. The experimental parameters of this study were the usage of anchorage at the ends of CFS, the number of CFS layers, and the applied load levels of 60%~90% of the static ultimate load obtained from the static tests. The failure modes and the load cycle-deflection relations were observed and discussed from the experimental results. Those results also showed that the U-shaped anchoring system changes the fatigue failure modes and influences greatly on the fatigue capacity of the strengthened beams.

요 지

최근 연구들은 특별한 정착장치 없이 실험보 하면을 CFS로 보강한 RC보에 반복하중이 작용하면 보강재 단부 집착계면이 피로파괴 된다고 보고하였다. 본 연구에서는 집착계면의 피로파괴를 지연 또는 방지시켜 피로내구성을 향상시키기 위해 단부측에 U형 밴드를 보강한 후 최대 100만회 피로실험을 실시하였다. 보강보 종류는 CFS를 하면 보강한 1겹 무밴드, 하면 및 단부를 U형 밴드로 보강한 1겹 U밴드와 3겹 U밴드가 있다. 실험변수들로는 단부의 U형 밴드 유무, CFS의 겹수, 정적실험으로부터 구한 정적 최대하중의 60%~90%의 재하하중 범위 등이 있다. 실험결과를 이용하여 파괴모드, 반복횟수-처짐 관계를 비교 분석하였다. 실험 결과에 의하면 단부의 U형 밴드는 집착계면의 부착파괴를 방지하고 콘크리트 모체와 CFS를 일체거동하게 하며, 피로강도 증가에 상당한 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

Keywords : Carbon fiber sheets(CFS), Fatigue durability, Load cycle-deflection relations

핵심 용어 : 탄소섬유시트, 피로내구성, 반복횟수-처짐 관계

* 정회원 부산대학교 토목공학과 박사수료

** 정회원 경성대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사

*** 정회원 인제대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

**** 정회원 부산대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

***** 정회원 부산대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail : cheung@pusan.ac.kr 051-510-2354

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량 구조물은 사용연한의 증가, 환경요인에 의한 손상, 교통량의 증대, 차량하중의 증가 등으로 균열, 과도한 처짐, 강성저하 등의 열화현상이 발생하며, 특히 지속적인 반복하중은 구조물의 강성을 감소시키고, 처짐을 증가시키는 현상을 일으킨다. 따라서 구조물의 계기능을 양호한 상태로 유지하기 위해서는 적절한 보수, 보강이 필요하다. 지금까지 철근콘크리트 구조물 보강 시스템에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 특히, 철근콘크리트 구조물의 특성을 고려한 섬유시트 보강에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 결과 섬유시트로 보강된 철근콘크리트보(이후 보강보라 함)에 반복하중이 작용하면 보강되지 않은 실험체에 비해서 정적내력 및 피로내력, 초기 처짐방지 그리고 처짐저항 효과가 큰 것으로 나타났다(김정섭 등, 2002, 조철희 등, 2002, Mohsen Shahawy et al. 1999). 그리고, 재하하중의 반복횟수가 증가하면 중앙처짐은 계속적으로 증가하며(조철희 등, 2002, Catalin Gheorghiu

et al. 2002), 보강재 단부의 접착계면에서 균열이 발생하고 접착계면을 따라 균열이 성장하여 보강재가 탈락되는 파괴가 발생하였다(Catalin Gheorghiu et al. 2002, 심종성 등, 1998, 장상훈, 1998). 이러한 단부 접착계면 파괴는 에폭시 접착제의 기본성능이 떨어지거나, 콘크리트와 탄소섬유시트 부착면의 처리가 부적절한 것에 기인하는 것으로 나타났다(장상훈, 1998).

그러므로 콘크리트 모체와 탄소섬유시트의 접착계면 피로파괴를 방지하고 피로강도를 향상시키기 위한 방법으로 실험보 단부의 정착부를 보강하면 접착계면 파괴를 효과적으로 방지하여 피로강도 증가에 상당한 효과가 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 반복하중이 작용할 때 접착계면의 파괴 방지여부에 따른 피로거동을 분석하기 위해서 단부의 U밴드 유무를 적용하였으며, 탄소섬유시트의 보강 겹수, 재하하중의 응력수준 범위를 반복하중 재하실험의 실험변수로 하였다. 반복하중 재하실험을 수행하여 보강보별 균열양상 및 파괴형태, 반복횟수-중앙처짐 관계를 비교·분석한다. 이런 결과를 이용하여 보강보별 회귀 분석식을 얻은 후 피로한계를 결정하여 보강보의 정적 및 동적 휨 보강 해석 및 설계에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 보강보

본 실험에서는 정적실험 3개, 피로실험 10개, 총 13개의 보강보를 제작하였다. 보강보는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 깊이 400mm, 폭 200mm, 길이 3,200mm의 직사각형 복철근 콘크리트보로 제작되었다. 인장측에 D22 철근을 2본, 압축측에 D13 철근을 2본, 전단파괴를 방지하기 위해서 D10 스티럽을 200mm 간격으로 배근하였으며, 설계두께 0.165mm, 단위중량 3N/m²인 일방향 탄소섬유시트를 하부에 폭 150mm, 길이 2,500mm로 부착하였다.

보강보의 구성재료의 역학적 특성치는 Table 1과 같다.

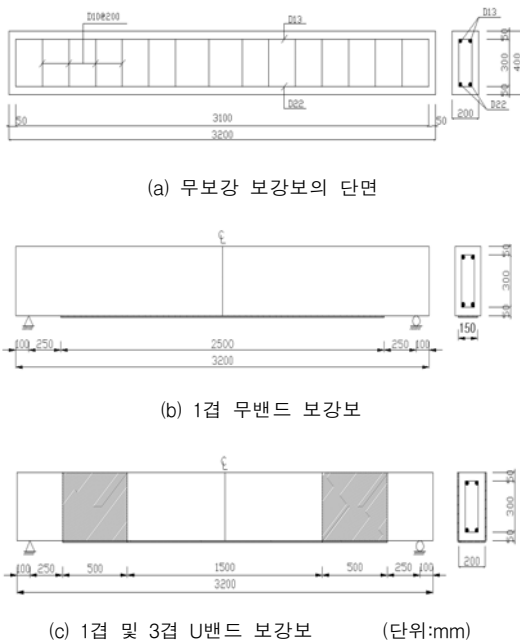


Fig. 1 보강보의 단면 및 탄소섬유시트 부착형태

Table 1 구성재료의 역학적 성질

구 성 재 료	역 학 적 성 질	
	콘 크 리 트	압 축 강 도
철 근	항 복 강 도	400 MPa
	인 장 강 도	3,550 MPa
탄 소 섬유	탄 성 계 수	2.35×10 ⁵ MPa
	파 단 변 형 률	0.015
	설 계 두 겹	0.165mm
	인 장 강 도	52.2 MPa
에 폭 시	압 축 강 도	81.1 MPa
	휨 강 도	63.8 MPa
	인장전단 부착강도	11.6 MPa

Table 2 보강보별 최대하중 및 재하하중

정 적 실험	보 강 보 종 류		최 대 하 중 (kN)	
		1 겹 무 밴 드		226.2
	1 겹 U 밴 드		258.7	
	3 겹 U 밴 드		299.5	
피 로 실험	보 강 보 종 류		재 하 하 중 (kN)	
			Pmax	Pmin
	1 겹 무 밴 드	정 적 최 대 하 중 60%	135.7	13.6
		정 적 최 대 하 중 70%	158.3	15.8
		정 적 최 대 하 중 80%	180.9	18.1
	1 겹 U 밴 드	정 적 최 대 하 중 70%	181.1	18.1
		정 적 최 대 하 중 80%	206.9	20.7
		정 적 최 대 하 중 85%	219.8	21.9
		정 적 최 대 하 중 90%	232.8	23.2
	3 겹 U 밴 드	정 적 최 대 하 중 60%	179.7	17.9
		정 적 최 대 하 중 70%	209.6	20.9
		정 적 최 대 하 중 80%	239.6	23.9

보강재 양에 따른 보강보의 거동을 고찰하기 위해서 현실적으로 가장 많이 시공하는 보강계수(1겹, 3겹)를 선택하였다. 탄소섬유시트와 콘크리트 모체의 부착성을 향상시키고 섬유시트의 탈락을 방지하기 위해 보강보의 양 단부에 폭 500mm의 U-밴드(휨 보강용 섬유시트와 동일한 계수 적용)를 시공하였다. 보강계수와 U-밴드 적용여부에 따라 보강보를 구분하였으며, 보강보별 최대하중 및 재하하중을 Table 2에 보강보의 단면 및 탄소섬유시트 부착형태를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

500kN 용량의 actuator를 이용하여 4점 휨 실험을 수행하였다. 정적실험은 보강보가 완전히 파괴될 때까지 변위제어방식으로 하중을 가하였으며, 하중-처짐 관계를 파악한 후 정적 최대하중을 결정하였다. 피로 실험에서 재하하중은 정적실험에서 얻은 정적 최대하중의 60%~90%로 하였으며, 하중비(Pmin/Pmax)는 0.1로 일정하게 하였다. 그리고, 재하하중의 파형은 정현파로 재하속도는 1Hz로 하였다. 최대 100만 회를 반복재하하며, 보강보의 탄소섬유시트가 파단되거나 부착파괴되어 완전히 보강보가 파괴될 때를 피로 파괴라 정의한다. 100만회 반복 재하후 피로파괴되지 않은 보강보는 정적파괴실험을 실시한 후 최대하중을 측정하였다. LVDT와 변형률 게이지를 이용하여 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 하중변화에 대한 보강보의 중앙부와 가력점의 변위 및 변형률을 측정하였다. 보강보의 하중 재하방법 및 LVDT와 변형률 게이지의 위치는 Fig. 2와 같다.

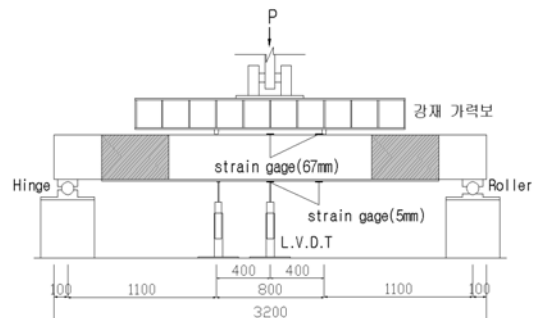
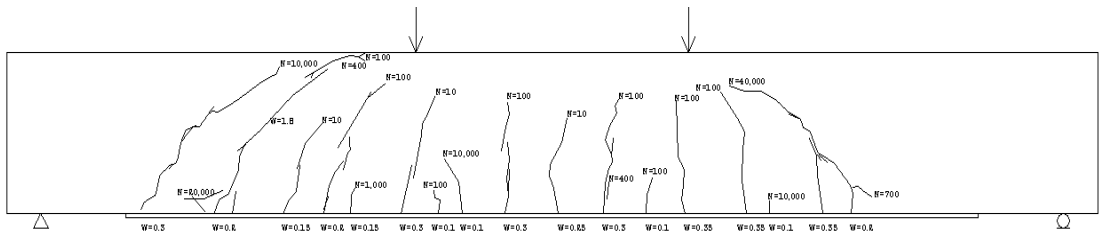


Fig. 2 하중재하 방법 및 LVDT와 변형게이지 위치

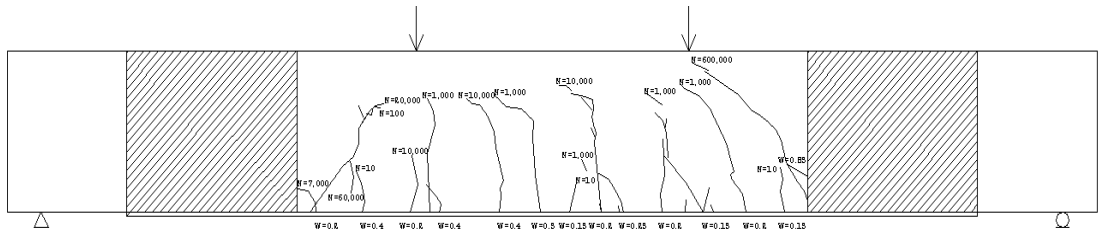
3. 피로실험결과

3.1 보강보의 균열양상 및 탄소섬유시트의 파단형태

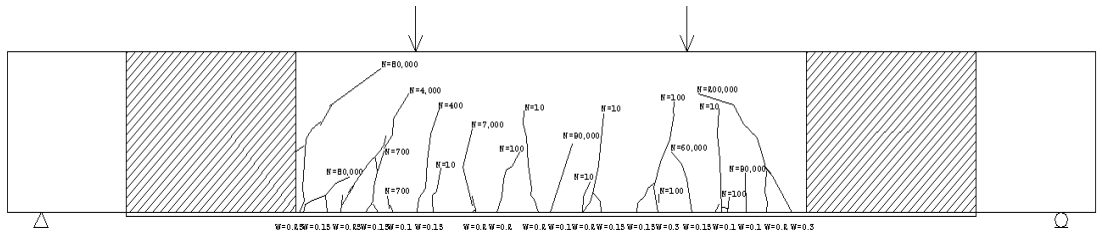
13개의 보강보중 피로실험을 수행한 1겹 무밴드, 1겹 U밴드, 3겹 U밴드 보강보의 대표적인 균열양상을 Fig. 3에 나타내었고, 보강보의 피로파괴시 탄소섬유시트의 파단형태를 Fig. 4에 나타내었다.



(a) 1겹 무밴드 보강보



(b) 1겹 U밴드 보강보



(c) 3겹 U밴드 보강보

W: 피로파괴시 균열폭(mm), N:반복횟수

Fig. 3 정적 최대하중 70%에서 보강보의 균열양상

재하하중의 반복횟수가 증가할 경우, 초기의 미세균열이 점차로 성장하여 균열폭이 확대되었다.

단부 U밴드가 있는 보강보는 순수 휨 구간에서 주 균열간의 간격이 줄어들고 잔균열수가 증가하였다. Fig. 3 (a)와 Fig. 4 (a)에 나타난 것과 같이 1겹 무밴드 보강보는 기존 연구결과들(Catalin Gheorghiu et al. 2002, 심종성 등. 1998, 장상훈. 1998)과 같이 단부측에 휨 전단균열이 발생하여 균열폭이 증가하면 단부에서 RC보와 보강재인 탄소섬유시트사이의 접촉계면에서 bond slip이 발생한 후 부착파괴로 보강보가 파괴되었다. 그러나, 본 실험결과중 재하하중의 응력수준이 정적 최대하중 60%일 때는 보강재 접촉계면의 부착파괴가 아닌 단부측의 휨 전단 균열폭이 점진적으로 증가하여 보강보가 파괴되었다.

재하하중의 응력수준이 높을수록 휨 구간의 균열수

가 증가하며 휨 전단균열의 발생이 단부측에 가까워지면서 균열폭이 증가하였다.

Fig. 3 (b)와 Fig. 4 (b)에 나타난 것과 같이 1겹 U밴드 보강보는 단부의 U밴드에 의하여 휨 전단균열이 억제되어 1겹 무밴드 보강보의 피로파괴 양상과 다르게 보강보의 중앙부에서 탄소섬유시트의 파단으로 파괴되었다. 그러므로 단부의 U밴드는 탄소섬유시트와 콘크리트 모체의 부착성능을 향상시켜 피로파괴까지 접촉계면의 부착파괴를 효과적으로 방지하였다.

Fig. 3 (c)와 Fig. 4 (c)에 나타난 것과 같이 3겹 U밴드 보강보는 단부의 U밴드에 의하여 휨 전단균열이 억제되며, 단부 U밴드와 탄소섬유시트 접합부에서 응력집중이 발생하여 탄소섬유시트의 파단으로 파괴되었다. 그러므로 단부 U밴드와 탄소섬유시트 접합부가 피로 취약점이 되는 것을 알 수 있다.

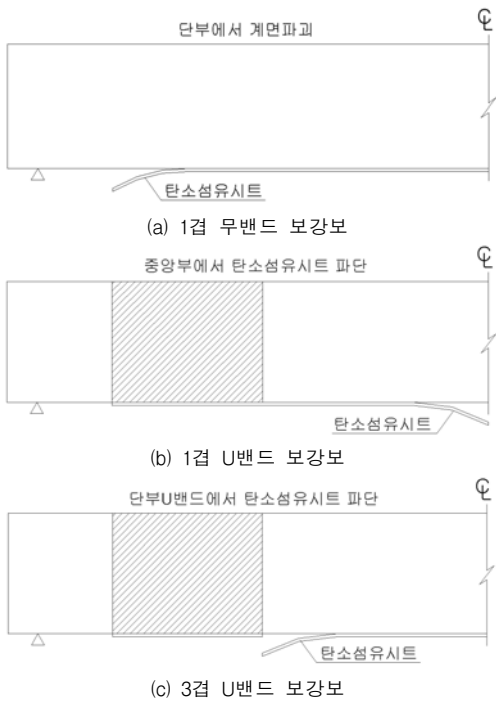


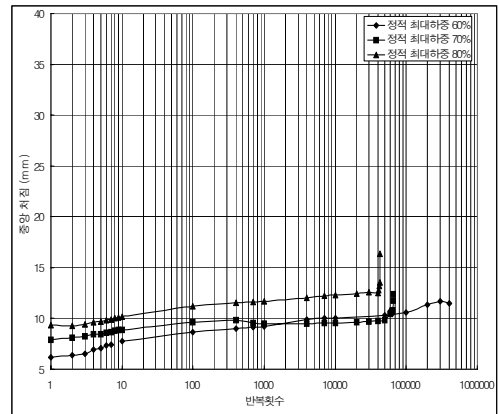
Fig. 4 보강보 피로파괴시 탄소섬유시트의 파단형태

3.2 반복 횟수-중앙처짐 관계

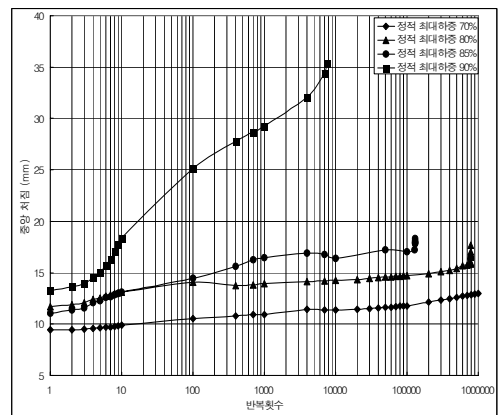
피로실험에서 1겹 무밴드, 1겹 U밴드, 3겹 U밴드 보강보의 반복횟수-중앙처짐 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 그리고 보강보별 피로파괴시의 반복횟수와 잔류 변위를 Table 3에 나타내었다.

보강보별 반복횟수와 중앙처짐은, Fig. 5에 나타난 것과 같이, 재하하중의 반복횟수가 증가하면 계속적으로 증가한다. 단부U밴드 유무와 탄소섬유시트 겹수 증가와 관계없이 실험 초기단계인 반복횟수 100회까지는 균열의 생성과 급속한 진전으로 중앙처짐이 크게 증가하며, 그 이후단계에서는 기존 균열의 점진적 성장으로 중앙처짐은 완만하게 증가하는 경향이 보인다.

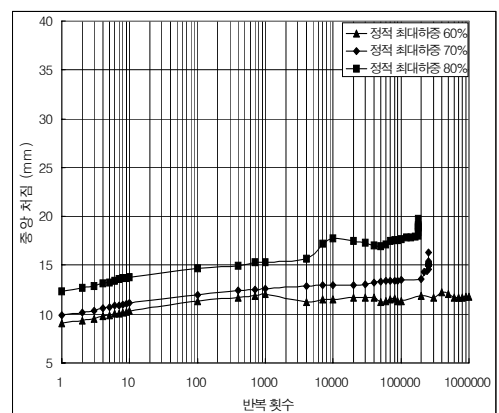
피로파괴 단계에서 1겹 무밴드 보강보는 콘크리트 모체와 탄소섬유시트의 부착파괴, 1겹 U밴드 보강보는 중앙부의 탄소섬유시트 파단, 3겹 U밴드 보강보는 단부 U밴드와 탄소섬유시트 접합부의 파단으로 인해 파괴시 중앙처짐은 급격하게 증가한다.



(a) 1겹 무밴드 보강보



(b) 1겹 U밴드 보강보



(c) 3겹 U밴드 보강보

Fig. 5 보강보별 반복횟수-중앙처짐 관계

Table 3 보강보별 피로파괴시의 반복횟수와 잔류변위

보강보 종류		피로파괴시 반복횟수	잔류변위 (mm)
1겹 무밴드	정적 최대하중 60%	400,000회	5.68
	정적 최대하중 70%	65,200회	6.40
	정적 최대하중 80%	42,600회	7.99
1겹 U밴드	정적 최대하중 70%	100만회	5.73
	정적 최대하중 80%	787,400회	9.09
	정적 최대하중 85%	129,000회	9.67
3겹 U밴드	정적 최대하중 90%	7,600회	23.81
	정적 최대하중 60%	100만회	5.41
	정적 최대하중 70%	253,000회	5.98
	정적 최대하중 80%	180,900회	9.15

Table 4 회귀 분석식 및 피로한계

보강보 종류	회귀 분석식	피로한계(ΔP)
1겹 무밴드	$\Delta P = -16.165 \times \ln(N) + 329.11$ (R ² =0.89)	105.8 kN
1겹 U밴드	$\Delta P = -6.719 \times \ln(N) + 266.09$ (R ² =0.77)	173.3 kN
3겹 U밴드	$\Delta P = -28.059 \times \ln(N) + 547.54$ (R ² =0.89)	159.9 kN

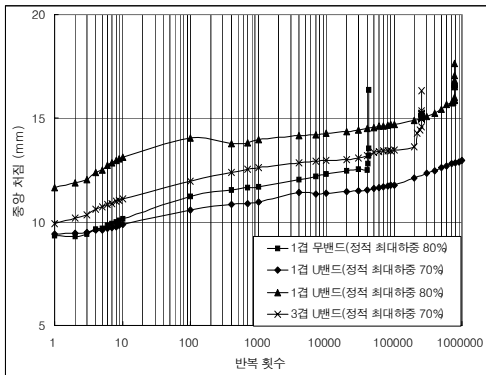


Fig. 6 동일한 하중에서 반복횟수-중량처짐

그러나 3.1절에서 전술한 것과 같이 Fig. 5 (a)의 정적 최대하중60%일 때는 일반적인 1겹 무밴드 보강보의 파괴양상과 다르게 상당한 하중반복을 경험하면서 단부측의 휨 전단균열의 진전으로 인해 중앙처짐이 완만하게 증가한 후 파괴되었다. Fig. 5 (b)의 정적 최대하중 90%의 경우는 재하하중이 보강보의 항복하중 수준이므로 실험 초기단계부터 급격하게 중앙처짐이 증가한다.

보강보별 피로파괴시의 반복횟수와 잔류변위는, Table 3에 나타난 것과 같이, 재하하중의 응력수준이 증가하면 피로파괴시 반복횟수는 감소하고 잔류변위는 증가하였다.

동일한 하중수준에서 단부U밴드 유무와 탄소섬유시트 겹수증가에 따른 피로내구성을 분석하기 위하여 1

겹 무밴드 정적 최대하중 80%, 1겹 U밴드 정적 최대하중 70%, 80%와 3겹 U밴드 정적 최대하중 70%를 Fig. 6에 나타내었다.

1겹 무밴드 정적 최대하중 80%(180.9kN)와 1겹 U밴드 정적 최대하중 70%(181.1kN)는 거의 동일한 하중으로 탄소섬유시트를 1겹 보강한 보에 단부U밴드가 있으면 중앙처짐이 적게 발생하고 반복횟수는 증가하며, 잔류변위가 감소하는 효과가 있다. 1겹 U밴드 정적 최대하중 80%(206.9kN)와 3겹 U밴드 정적 최대하중 70%(209.6kN)를 비교하면 3겹 U밴드 보강보는 탄소섬유시트 겹수 증가로 휨 강성이 증가하여 중앙처짐이 적게 발생하지만, 1겹 U밴드 보강보보다는 피로파괴시 반복횟수가 크게 감소하므로 취성거동함을 알 수 있다.

반복횟수 100만회에도 피로파괴 되지않은 보강보를 정적파괴 실험하여 측정된 최대하중은 1겹 U밴드 정적 최대하중 70%와 3겹 U밴드 정적 최대하중 60%에서 각각 246.6kN, 315.5kN로 나타났다. Table 2의 정적실험의 최대하중과 비교하면 하중강도비가 5%이내로 반복 100만회 이후의 하중강도의 변화는 미소하였다.

3.3 보강보별 ΔP - N선도

각 보강보의 피로실험결과를 최대하중(Pmax)과 최소하중(Pmin)의 차이값인 ΔP와 피로파괴까지의 반복횟수 N의 관계(ΔP-N선도)로 Fig. 7에 나타내었다.

그리고 실험결과들을 회귀분석하여 구한 각 보강보에 대한 회귀곡선을 Fig. 7에 실선으로 도시하였고, 회귀 분석식을 Table 4에 나타내었다. 회귀곡선의 산

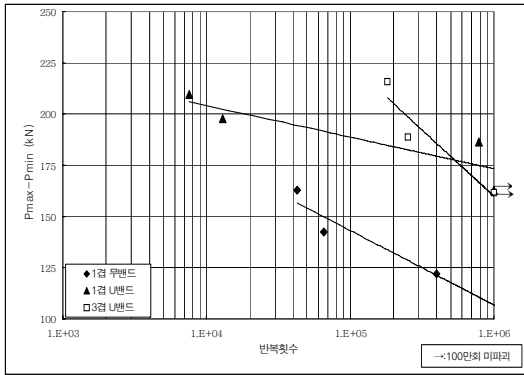


Fig. 7 보강보별 $\Delta P - N$ 선도

출에 있어서는 100만회에도 파괴되지 않은 실험결과 (1겹 U밴드 보강보 1개, 3겹 U밴드 보강보 1개)를 포함시켰으며, 회귀곡선으로 부터 구한 100만회의 피로강도를 피로한계로 가정하였다.

3겹 U밴드 보강보는 회귀곡선으로 구한 피로한계와 100만회에도 파괴되지 않은 보강보의 피로강도와 거의 동일하지만, 1겹 U밴드 보강보의 경우는 실험결과 보다 높은 피로한계를 나타내었다.

단부 U밴드의 유무에 따른 피로강도 및 피로한계를 비교하면 Fig. 7에 나타난 것과 같이 피로강도 및 피로한계는 1겹 U밴드 보강보가 1겹 무밴드 보강보보다 크게 증가함을 알 수 있다. 예를 들어, 반복횟수 20만 회일 때의 피로강도를 분석하면 1겹 무밴드 보강보는 131.8kN, 1겹 U밴드 보강보는 184.1kN로 1겹 무밴드 보강보 보다 40%정도 증가하였다. 그리고 피로한계는 1겹 무밴드 보강보보다 65%정도 증가하였다. 이와 같은 결과로 보강보의 단부U밴드는 피로강도와 피로한계를 상당히 향상시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

동일한 하중범위에서 탄소섬유시트 겹수 증가에 따른 1겹 U밴드 보강보와 3겹 U밴드 보강보의 피로수명을 비교하면, 하중범위 $\Delta P=200\text{kN}$ 인 경우에 1겹 U밴드 보강보보다 3겹 U밴드 보강보가 12배정도 장수명이다. 그러나 $\Delta P=180\text{kN}$ 인 경우에 1겹 U밴드 보강보보다 3겹 U밴드 보강보가 1.3배정도 단수명이다. 즉, 탄소섬유시트 겹수가 많은 경우 하중범위가 높을수록 피로수명이 증가하지만 하중범위가 낮을 때

는 오히려 피로수명이 감소하는 결과가 얻어졌다. 단, 실험결과로 얻어진 피로한계는 거의 동일하였다.

4. 결론

본 연구에서는 반복하중이 작용할 때 접착계면의 파괴 방지여부에 따른 피로거동을 분석하기 위해서 단부의 U밴드 유무에 따른 정적실험과 피로실험을 수행하였다. 본 실험으로 구해진 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) 단부 U밴드가 없는 경우에는 콘크리트 모체와 탄소섬유시트의 접착계면의 부착파괴로 보강보가 파괴되지만, 단부 U밴드가 있는 경우에는 접착계면의 부착파괴를 방지하여 주균열의 간격이 줄어들고 잔균열수가 증가하여 1겹 U밴드 보강보의 중앙부에서 탄소섬유시트가 파단된다. 3겹 U밴드 보강보는 탄소섬유시트 겹수 증가로 단부 U밴드와 탄소섬유시트 접합부가 파괴에 취약점이 된다.
- 2) 반복횟수-중앙처짐 관계를 살펴보면 단부U밴드 유무와 탄소섬유시트 겹수 증가와 관계없이 실험 초기단계인 반복횟수 100회까지는 중앙처짐이 크게 증가하며, 이후단계에는 완만하게 증가한다. 파괴 파괴 단계에서는 중앙처짐은 급격하게 증가한다. 재하하중의 응력수준이 증가하면 파괴시 반복횟수는 감소하며, 잔류변위는 증가한다. 단부 U밴드가 있는 경우에는 중앙처짐이 적게 발생하고 반복횟수가 증가하며, 잔류변위가 감소하는 효과가 있다. 보강보의 탄소섬유시트 겹수가 증가하면 휨 강성이 증가하여 중앙처짐이 적게 발생하지만, 1겹 U밴드 보강보보다 3겹 U밴드 보강보가 취성거동을 한다.
- 3) $\Delta P-N$ 관계를 살펴보면 단부 U밴드가 있는 경우에는 피로강도와 피로한계를 상당히 향상시키는 효과가 있다. 탄소섬유시트 겹수가 많은 경우 하중범위가 높을수록 피로수명은 증가하며 하중범위가 낮을 때는 피로수명이 감소하는 결과가 얻어졌다.
- 4) 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트보에 적절한 단부 정착장치를 하면 피로내구성 향상에 상당한 효과가 있다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초 연구(과제번호 R01-2004-000-10614-0)지원으로 수행된 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김정섭, 조창호, 박영배, 조철희, “철근콘크리트 보의 탄소섬유시트 보강에 따른 피로거동에 관한 실험적 연구” 대한건축학회 논문집, 제18권, 제12호, 2002, pp.19~26.
2. 조철희, 최진석, 김민국, 김정섭, “피로하중을 받는 철근콘크리트 보의 탄소섬유시트 보강에 따른 구조특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 학술발표 논문집 제22권 제1호, 2002, pp.99~102.
3. 심종성, 배인환, 장상훈, “강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 철근콘크리트 보의 확률론적 피로해석” 대한토목학회 논문집 제18권 제 I-4호, 1998. 7, pp437~445.
4. 장상훈, “탄소섬유 쉬트로 보강한 R/C보의 피로거동에 관한 실험 및 해석적 연구”, 한양대 학교 대학원 석사학위 논문, 1998. 6.
5. Mohsen Shahawy, Thomas E. Beitelman, “Static and Fatigue of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates”, Journal of Structural Engineering, ASCE, V125, NO. 6 June. 1999, pp613~621.
6. Catalin Gheorghiu, Pierre Labossiere, Jean Proulx, “Fatigue and monotonic of RC beams strengthened with CFRPs”, SCIENCE DIRECT, V14, NO. 2 May, 2005, pp.587~592.
7. Norby, G. M., “Fatigue of concrete-A Review of Research”, ACI Journal, Vol.57, No.8, 1958 pp174~219.

급행(접수일자 : 2006년 8월 8일)