



FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 거동

김경남¹⁾ · 박상렬²⁾ · 김창훈^{2)*}

¹⁾(주)제이피엠엔지니어링, ²⁾제주대학교 토목공학과

Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons

Kyoung-Nam Kim,¹⁾ Sang-Yeol Park,²⁾ and Chang-Hoon Kim^{2)*}

¹⁾JPM Engineering, Jeju 690-815, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Jeju University, Jeju 690-756, Korea

ABSTRACT Recently, researches about fiber reinforced polymer (FRP) which has excellent durability, corrosion resistance, and tensile strength as a substitution material to steel tendon have been actively pursued. This study is performed to examine FRP tendon used prestressed beam's safety under service load. The specimen was a prestressed concrete beam with internal bonded FRP tendon. In order to compare the member fatigue capacity, a control specimen of a prestressed concrete beam with ordinary steel tendon was tested. A fatigue load was applied at a load range of 60%, 70%, and 80% of the 40% ultimate load, which was obtained through a static test. The fatigue load was applied as a 1~3 Hz sine wave with 4 point loading setup. Fatigue load with maximum 1 million cycles was applied. The specimen applied with a load ranging between 40~60% did not show a fatigue failure until 1 million cycles. However, it was found that horizontal cracks in the direction of tendons were found and bond force between the tendon and concrete was degraded as the load cycles increased. This fatigue study showed that the prestressed concrete beam using FRP tendon was safe under a fatigue load within a service load range. Fatigue strength of the specimen with FRP and steel tendon after 1 million cycles was 69.2% and 59.8% of the prestressed concrete beam's static strength, respectively.

Keywords : FRP(fiber reinforced polymer), fatigue, prestressed concrete, S-N curve, stress ranges

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 구조물은 일반 철근콘크리트 구조물에 비해 역학적으로 강재와 콘크리트 재료를 높은 응력 수준에서 유효하게 이용할 수 있고 콘크리트의 단면을 유효하게 이용할 수 있어 경제적으로 사용할 수 있다. 그리고 긴장재 배치 따라 휨 강성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 기존 프리스트레스트 콘크리트 구조물에 들어가는 보강재는 대부분 철근(steel)을 사용하고 있어 열악한 환경에 노출되는 경우에는 부식으로 인한 내구성 저하를 피할 수 없다. 구조물의 부식으로 인한 내구성 저하는 보수, 보강 비용의 증가라는 심각한 문제를 유발시키고, 특히 프리스트레스트 콘크리트의 경우 긴장재의 부식은 구조 내력의 심각한 손실을 가져온다. 이와 같은 부식 문제를 가지고 있는 강재의 대체재로 FRP(fiber reinforced polymer, 이하 FRP)를 이용한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.

FRP 긴장재는 기존의 강재 긴장재에 비해 우수한 내

부식성, 매우 높은 인장강도 등의 장점을 가지고 있어 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 긴장재로 사용될 수 있는 가장 이상적인 조건을 가지고 있다. 그러나 FRP 긴장재는 파단 시까지 소성 변형 없이 선형 탄성 거동을 하며, 인장강도에 비하여 전단강도가 매우 작고, 응력-파손의 위험이 있으며 매우 높은 시공비가 요구되는 단점이 있다.¹⁾

국외에서는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이를 바탕으로 시험 시공을 통해 장기적인 역학적 거동을 분석 연구하는 단계까지 도달하였으나 국내의 경우는 최근 FRP 콘크리트에 대한 규정이 준비 중인 단계이다. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서의 정적 거동에 대한 연구가 대부분이었으나, 최근 국내에서 상용화된 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근을 이용한 콘크리트 휨 부재의 피로 특성에 관한 연구 결과 낮은 응력 수준에서 인장부 보강근의 파단으로 인한 파괴가 나타났다.²⁾ 또한 CFRP 긴장재의 비부착 및 부분 비부착에 대한 피로 거동 등의 연구가 이루어지고 있으나 아직 부족한 실정이다. 따라서 국내에서 개발된 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물이 사용 하중 상태에서 반복 하중에 의한 긴장재의 피로에 대한 안전성 검

*Corresponding author E-mail: changhoon-k@hanmail.net

Received March 11, 2010, Revised January 19, 2011,

Accepted February 14, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

토는 중요한 항목이다.

이 연구에서는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여 반복 하중에 따른 FRP 긴장재의 피로거동을 분석하고, PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보와 비교 분석하여 철의 대체 재료로서 FRP 긴장재 사용에 대한 안전성과 타당성을 평가하는데 주 목적을 두고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 시험체 제원

프리스트레스트 콘크리트 시험체의 주 인장재로 사용된 긴장재는 FRP 긴장재와 PS 강연선을 사용하여 T형 단면으로 Fig. 1과 같은 제원으로 제작하였다.

2.1.1 실험 및 데이터 수집

실험은 4점 재하법으로 정적 실험인 경우 변위 제어 방식으로 1.5 mm/min의 속도로 재하하였고, 피로 실험은 하중 제어 방식으로 실시하였다. 피로 실험 시 반복 하중은 sine파를 이용하여 재하 속도에 큰 영향을 받지 않는 1~3 Hz로 재하하였다. 반복 하중의 범위는 FRP 긴장재 프리스트레스트 콘크리트 보의 정적 실험을 실시하여 얻은 결과로부터 극한 하중 값을 기준으로 반복 하중의 범위를 결정하였다.

피로 실험 방법은 ACI 440.3R에 제시된 방법 중 최소 하중을 일정하게 유지하고 최대 하중을 변화시키는 방법을 선택하여 실시하였다.³⁾ 이 실험에서는 정적 실험을 통해서 얻은 극한 하중의 40%를 최소 하중으로 일정하게 고정하고 최대 하중은 극한 하중의 60%, 70%, 80%로 변화시키면서 피로 실험을 실시하였다.⁴⁾

피로 실험 기준으로는 총 200만회 이상의 반복 하중 가력에 대하여 안전해야하나, 이 실험은 소형 실험체로서 실구조물의 재하 횟수인 1/2인 100만회를 기준으로 선정하였다.⁵⁾

정적 실험에서 초기 재하 하중의 약 20 kN 마다 균열을 확인하여 표시하였고, 그 이후에 반복 횟수에 따른 정

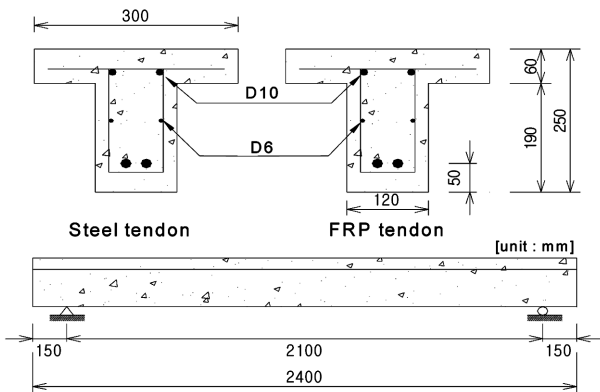


Fig. 1 Dimensions of specimen

적 실험 시 반복 하중에 의해 발생한 추가 균열을 표시하고 균열 폭이 가장 큰 부분을 균열 측정기를 이용하여 측정하였다. Fig. 2와 같이 시험체의 변위를 측정하기 위하여 보의 중앙에 변위계(LVDT)를 설치하였고, 반복 횟수에 따른 보의 잔류 처짐을 측정하기 위해 변위계와 함께 다이얼 게이지를 설치하여 그 값들을 측정하였다.

피로 실험 시 데이터 측정은 반복 횟수 1, 10^3 , 10^4 , 10^5 , 2.5×10^5 , 5.0×10^5 , 7.5×10^5 , 10^6 회에 정적 실험을 실시하여 하중과 처짐, 콘크리트의 변형률, 내부 긴장재의 변형률 값들을 동적 변형률 측정기를 통해서 측정하였다.

데이터의 수집은 동적 변형률 측정기와 자동 데이터 수집 프로그램을 이용하였고, 균열 측정기 및 디지털 카메라 등을 사용하여 기록하였다.

2.2 재료

2.2.1 FRP 긴장재

이 연구에서 사용한 FRP 긴장재는 KICT 긴장재를 사용하였다. KICT 긴장재는 탄소섬유와 비닐에스터 수지를 결합시켜 생산하였다. FRP 긴장재에 폴리비닐알콜 섬유를 사용하여 피복하였고, KICT 긴장재는 부착력을 높이기 위해 피복 형상을 X형으로 제작하였으며, 형상은 Fig. 3과 같다. KICT 긴장재는 원형 단면의 공칭 직경 $\phi 9.5$, 유효 면적 70.88 mm^2 로서, Table 1에 기본 제원을 나타내었다.⁶⁾ FRP 긴장재는 철근과는 달리 소성 거동을 하지 않는다. FRP 긴장재의 거동은 Fig. 4와 같이 파단 시까지 소성 변형 없이 선형-탄성 거동을 한다.

2.2.2 PS 강연선

PS 강연선은 국내 D철강에서 생산한 프리스트레싱용 강연선으로 SWPC7B등급의 직경 12.7 mm를 사용하였다. Table 2는 PS 강연선의 역학적 성질을 나타낸 것이다.

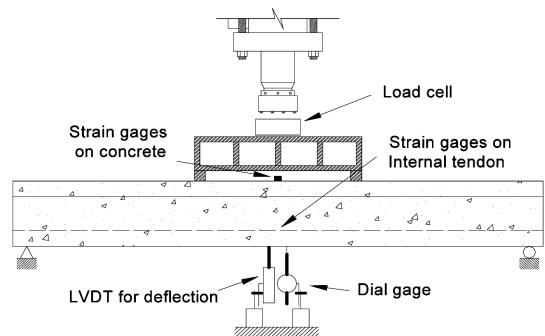


Fig. 2 Arrangement for data acquisition

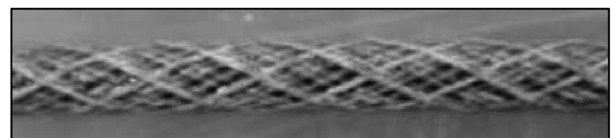


Fig. 3 Shape of FRP tendon

Table 1 FRP tendon specification

Type	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)	Elastic modulus (GPa)
Rod	φ 9.5	70.88	2,500	1.8	135

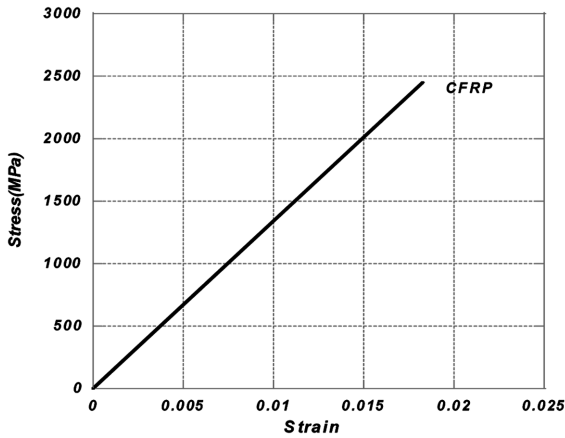


Fig. 4 Stress-strain curve of FRP tendon

2.2.3 철근

철근은 SD400 등급 철근으로 압축 철근과 스티럽은 H10을 사용하였다. 철근의 인장 시험 결과는 Table 3과 같다.

2.2.4 콘크리트

시험체 제작 시 사용한 콘크리트는 설계 강도가 35 MPa로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트는 굵은 골재 최대치수가 25 mm, 슬럼프 값은 150 mm이고 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였다. 공시체의 압축강도 시험 결과는 Table 4와 같다.

2.3 실험 변수

이 연구에 사용된 실험 변수는 Table 5에 정리하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 정적 실험 결과

피로 실험 전 반복 하중 범위를 산정하기 위하여 먼저

Table 2 Steel tendon specification

Type	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Yield stress (MPa)	Yield elongation (%)	Tensile stress (MPa)	Elastic modulus (GPa)
1×7 strand	φ 12.7	98.71	1,798.8	4.32	1,894.4	200

Table 3 Test results of tensile strength of reinforcement

Type	Diameter (mm)	Yield load (kN)	Yield strength (0.2%) (kN)	Elongation (%)	Ultimate load (kN)	Elastic modulus (GPa)
bar	H10	41.3	41.7	20.03	49,794.1	197.34

Table 4 Results of compressive strength test

Specimens	Failure load (N)	Compressive stress (MPa)
1	274,522	34.96
2	280,255	35.69
3	285,595	36.37
4	276,486	35.21
5	291,404	37.11
Average	280,778.7	35.76

Table 5 Experimental parameters

Parameter	Specimens	Internal tendon	Load ranges (%)
FRP	Static	PFU0	-
	Fatigue	PFU80	40~80
		PFU70	40~70
		PFU60	40~60
Steel	Static	PSU0	-
	Fatigue	PSU80	40~80
		PSU70	40~70
		PSU65	40~65
		PSU60	40~60

예비 실험을 실시하였다. 시험체의 사용 하중 범위 내인 반복 하중(극한 하중을 기준으로 최소 하중 10%에서 최대 하중 40%)을 가한 결과 피로 파괴를 보이지 않아 사용 하중 상태의 응력 범위 내에서는 안전한 것으로 판단되었다. 그러나 반복 하중 횟수에 따른 S-N curve를 작도하기 위해서는 시험체의 파괴 또는 긴장재의 파단 등 피로 파괴 양상을 가져야 하므로 피로 파괴를 유도하기 위해 반복 하중의 범위를 극한으로 설정하는 것이 필요하다고 판단되었다.

반복 하중 범위를 산정하기 위하여 내부 부착 FRP 프리스트레스트 콘크리트 보 시험체(PFU)에 대해 각각 정적 실험을 실시하였다. Fig. 5는 정적 실험 결과로 FRP를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보와 PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 하중-처짐도를 나타낸 것으로 PFU 시험체의 경우 약 70 kN 이후에는 FRP 재료의 특징에 맞게 선형 탄성 거동을 보였다. Table 6은 시험체의 정적 실험의 결과로써 극한 하중 및 파괴 형태를 나타낸 것이다.

Fig. 6은 정적 실험을 통해 최종 파괴되었을 때의 균열 형태를 나타낸 것으로, FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU)는 초기 균열 이후 하중 재하점에서 지점 방향으로 보강근이 놓여있는 위치에서 가로 균열이 발생하면서 분포가 넓은 반면, PS 강연선을 이용한 시험체(PSU)는 초기 중앙부 균열이 파괴 시에 이르기까지 주 균열로 성장하여 상부 플랜지까지 성장하였다.

3.2 피로 실험 결과

Tables 7과 8은 피로 실험 결과를 정리한 표로서 FRP

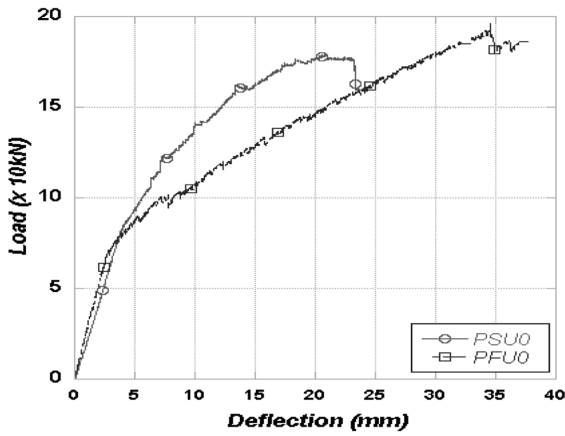


Fig. 5 Load-deflection curves of static test

Table 6 Test results of static experiment

Specimens	Ultimate strength (kN)	Ultimate deflection (mm)*	Ultimate strain of internal tendon ($\times 10^{-3}$)**	Failure type
PFU0	192	37.68	8.4	FRP rupture
PSU0	179	22.71	4.8	Compression failure

*Deflection at ultimate load, **Increased strain from effective strain

긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보와 PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험 결과를 나타낸 것이다. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험은 정적 실험 결과 통해서 나온 극한 하중 192 kN을 기준으로 40~60%, 40~70%, 40~80%로 나누어 실험을 실시하였다. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 강도와 비교하기

Table 7 Summary of PFU specimens fatigue test results

Specimens	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	Number of cycles	Resident deflection (mm)	Max. deflection (mm)	Crack width (mm)	Failure type
PFU60	115.2	76.8	1	0.84	12.72	1.05	No failure
			10^3	0.03	12.77	1.08	
			10^4	0.14	12.9	1.08	
			10^5	0.04	13.65	1.07	
			2.5×10^5	0.00	13.75	1.10	
			5×10^5	0.02	13.86	1.11	
			7.5×10^5	0.00	14.71	1.16	
PFU70	134.4	76.8	1	1.40	19.16	1.18	Partial debonding failure
			10^3	0.44	19.72	1.27	
			10^4	0.10	19.77	1.27	
			10^5	0.55	20.77	1.30	
			2.5×10^5	0.12	22.76	1.44	No failure
			5×10^5	0.37	24.49	1.48	
			7.5×10^5	0.06	26.70	1.51	
PFU80	153.6	76.8	1	1.25	25.70	2.64	FRP tendon rupture
			10^3	1.42	26.60	3.45	

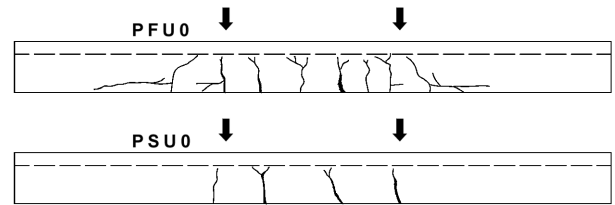


Fig. 6 Cracks of static test

위한 PS 강연선 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험은 극한 하중 179 kN을 기준으로 40~60%, 40~65%, 40~70%, 40~80%로 나누어 피로 실험을 실시하였다.

3.3 시험체별 분석

3.3.1 PFU60 시험체

PFU60 시험체의 반복 하중 범위는 최소 하중을 76.8 kN으로 하고 최대 하중을 115.2 kN으로 하여 sine파로 2.5 Hz의 주기로 실험을 실시하였다.

PFU60 시험체는 가장 낮은 단계의 하중 범위로 100만회에 이르는 동안 피로 파괴는 보이지 않았다. Fig. 8은 PFU60 시험체의 반복 횟수에 따른 피로 하중-처짐도로 반복 횟수가 증가함에 따라 잔류 처짐량이 조금씩 증가하였고 초기 정적 실험 시 잔류 처짐량이 가장 많이 발생하였다. Fig. 7은 PFU60 시험체의 실험 모습과 균열 형태를 보여주고 있다.

3.3.2 PFU70 시험체

PFU70 시험체는 극한강도의 40~70%(76.8~134.4 kN)를 반복 하중으로 실험을 실시하였다. Fig. 9는 100만회까지

Table 8 Summary of PSU specimens fatigue test results

Specimens	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	Number of cycles	Resident deflection (mm)	Max. deflection (mm)	Crack width (mm)	Failure type
PSU60	107.4	71.6	1	0.60	7.08	-	No failure
			10^3	0.22	7.45	0.03	
			10^4	0.12	7.89	0.04	
			10^5	0.12	8.14	0.04	
			2.5×10^5	0.16	8.41	0.06	
			5×10^5	1.95	12.58	1.24	
			7.5×10^5	2.54	15.94	2.01	
PSU65	116.4	71.6	1	0.49	7.93	0.56	Debonding failure
			10^3	0.66	11.02	0.85	
			10^4	0.78	13.98	1.12	
			10^5	5.75	22.09	2.22	
			2.5×10^5	12.58	35.95	4.15	
PSU70	125.3	71.6	5×10^5	0.14	10.80	0.80	Debonding failure
			7.5×10^5	3.50	18.59	1.73	
			10^6	15.6	51.58	5.39	
PSU80	143.2	71.6	1	0.12	12.84	1.57	Debonding failure
			10^3	7.96	26.94	3.52	

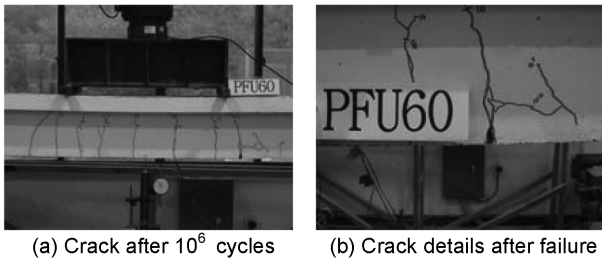


Fig. 7 Real view of PFU60 specimens

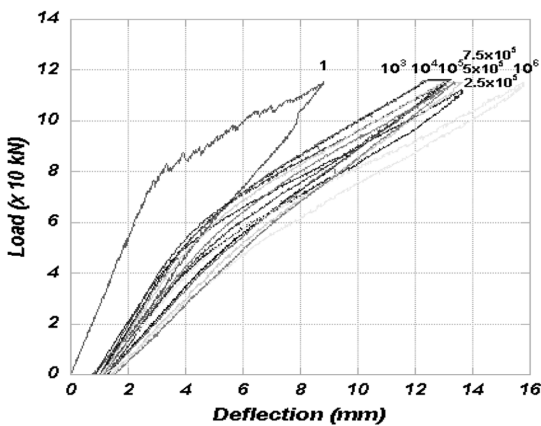


Fig. 8 L-D curves with the number of cycles (PFU60)

반복 하중을 받은 시험체의 하중-처짐도로 그래프에서 보이는 것과 같이 PFU70 시험체의 경우 대체로 PFU60 시험체와 유사한 거동을 보였다. 균열 양상은 피로 실험 초기 중앙부에서 균열이 크게 나타났으나, $10^3 \sim 10^4$ 회 사이에 반복 하중을 받으면서 하중 재하점 하단부에서 새로운 균열이 나타나면서 균열폭이 증가하였다. 약 43만회에서는 긴장재 위치에서 가로 방향의 균열들이 발생하였

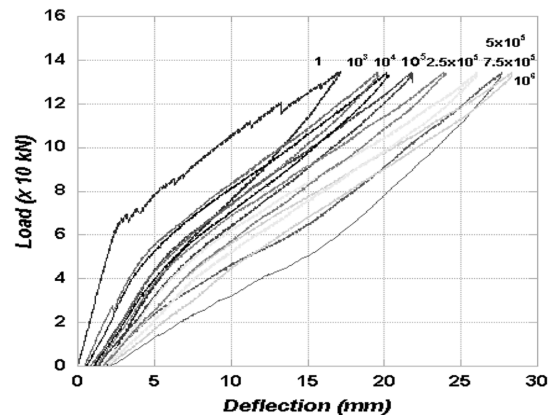


Fig. 9 L-D curves with the number of cycles (PFU70)

고, 약 65만회에 이르자 콘크리트 인장부의 피복이 떨어지 나가는 부분 부착 파괴를 보였다. 그러나 100만회까지 콘크리트 압축부나 긴장재에서의 피로 파괴는 발생하지 않았다. Fig. 10은 PFU70의 균열 및 파괴 사진을 나타낸 것이다.

3.3.3 PFU80 시험체

극한 하중의 40~80%의 가장 높은 단계의 반복 하중을 받은 PFU80의 시험체는 1~3 Hz로의 반복 속도로 실험을 실시하였다. PFU80 시험체의 피로 실험 결과 약 2,400회에서 중앙부의 균열부에서 내부 긴장재의 파단으로 인한 보의 파괴가 일어났다. Fig. 11은 1,000회까지 정적 실험을 통한 하중-처짐 곡선을 나타낸 것으로써 PFU80 시험체의 경우도 초기에는 다른 시험체와 같은 거동을 보였다. 반복 하중으로 인해서 초기 최대 처짐량이 높게 나타났고, 중앙부 균열부에서 응력 집중으로 인한 FRP 긴장재의 파단이 발생하였다. Fig. 12는 PFU80 실험 시 균열 및 파괴 모습을 나타낸 것이다.

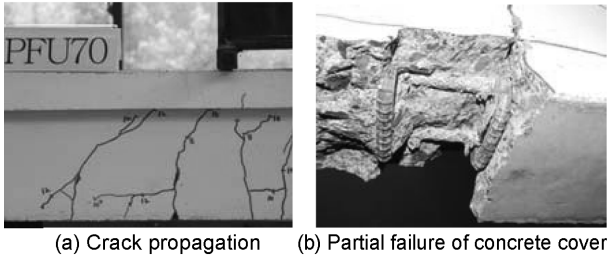


Fig. 10 Real view of PFU70 specimens

3.3.4 PSU60 시험체

Fig. 13은 PSU60 시험체의 하중-처짐 관계로서 초기 거동은 PFU 시험체의 거동과 비슷하나 25만회 이후 기울기가 급격하게 증가함을 보여주고 있다. 이는 반복 횟수가 증가함에 따라 PS 강연선와 콘크리트 사이에서의 부착력 저하(debonding)로 인해서 유효 프리스트레스 힘이 줄어들었기 때문이다. Fig. 14는 PSU60 시험체의 실험 모습과 균열 형태를 보여주고 있다.

3.3.5 PSU65 시험체

PSU65 시험체의 반복 하중은 극한 하중의 40~65%로서 그 하중 범위는 71.6~116.4 kN이다. 초기 실험 시 반복 속도를 3 Hz로 실시하였으나 미끄럼(slip)이 발생한 이후에 액츄에이터가 반복 하중의 최대 하중과 최소 하중 범위를 못 쫓아가는 현상으로 인해서 반복 속도를 2.5 Hz로 낮추어 실시하였다. Fig. 15는 피로 파괴까지 시험체의 반복 하중에 따른 하중-처짐도이다. PSU65 시험체의 경우 반복 횟수 10^4 회 이후에 콘크리트와 긴장재의

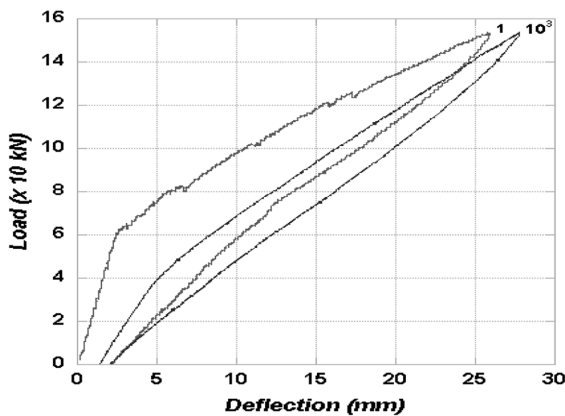


Fig. 11 L-D curves with the number of cycles (PFU80)

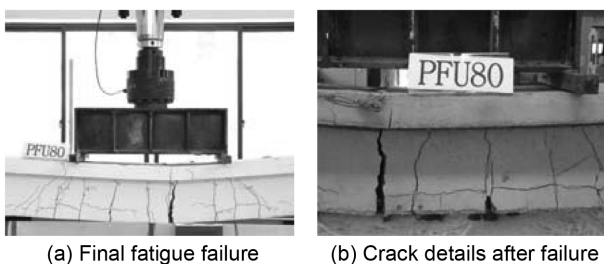


Fig. 12 Real view of PFU80 specimens

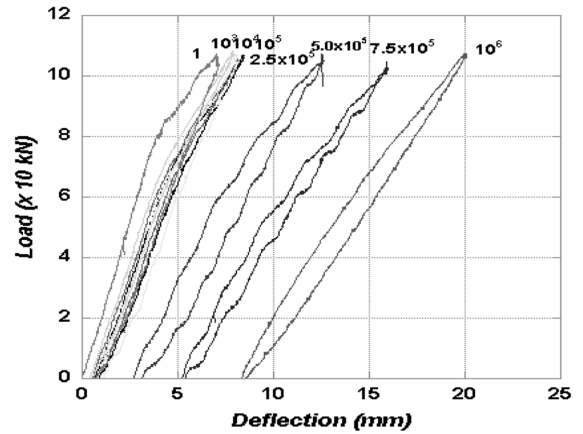


Fig. 13 L-D curves with the number of cycles (PSU60)

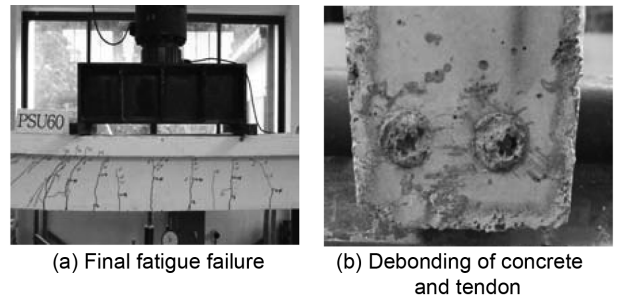


Fig. 14 Real view of PSU60 specimens

부착력 저하가 발생하여 반복 하중을 받은 시험체의 잔류 처짐량 및 최대 처짐량이 증가함을 알 수 있었다. Fig. 16은 PSU65 시험체의 피로 실험 및 파괴 사진이다.

3.3.6 PSU70 시험체

PSU70 시험체의 경우 초기 실험 시 반복 속도를 2.5 Hz로 실시하였다. Fig. 17은 PSU70 시험체의 10^4 회까지 반복 하중에 따른 하중-처짐도이다. PSU70 시험체의 경우 반복 횟수 10^3 회 이후에 콘크리트와 긴장재 사이의 부착력 저하가 조금씩 발생하여 잔류 처짐이 급격히 증가하였고, 약 2만회에 부착 파괴가 발생하였다. Fig. 18은 PSU70 시험체의 피로 실험 및 파괴 사진이다.

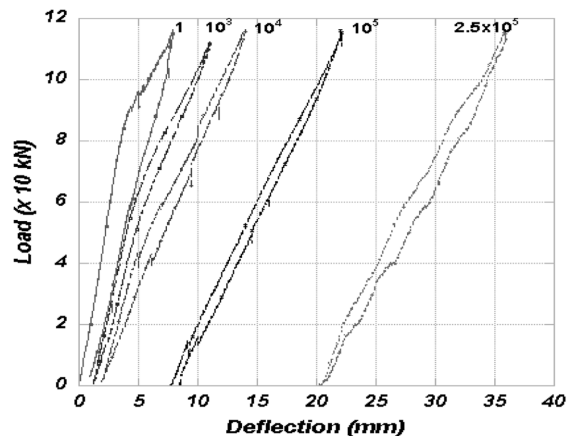


Fig. 15 L-D curves with the number of cycles (PSU65)

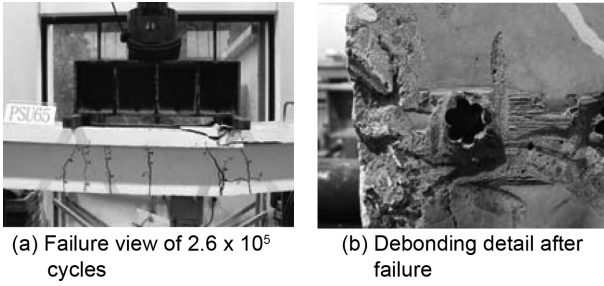


Fig. 16 Real view PSU65 specimens

3.3.7 PSU80 시험체

극한 하중의 40~80%의 반복 하중을 받은 PSU80 시험체는 2 Hz의 반복 속도로 실험을 실시하였다. 실험 결과 PSU80 시험체는 약 2,300회에서 긴장재와 콘크리트 사이의 미끄럼으로 인한 보의 부착 파괴가 일어났다. Fig. 19는 10^3 회까지 정적 실험을 통한 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. PSU80 시험체도 초기에는 다른 시험체와 같은 거동을 보였다. 높은 반복 하중 범위로 인해 다른 시험체에 비해서 미끄럼이 초기에 나타나 조기 파괴가 발생하였다. Fig. 20은 PSU80 실험 사진 및 파괴 모습을 나타낸 것이다.

3.4 반복 횟수에 따른 최대 처짐 관계

3.4.1 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 21은 PFU 시험체 반복 횟수에 따른 최대 처짐량

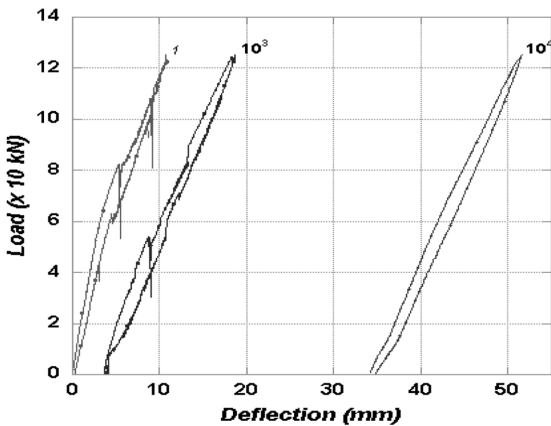


Fig. 17 L-D curves with the number of cycles (PSU70)

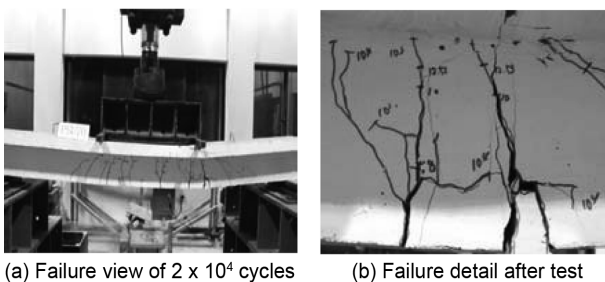


Fig. 18 Real view PSU70 specimens

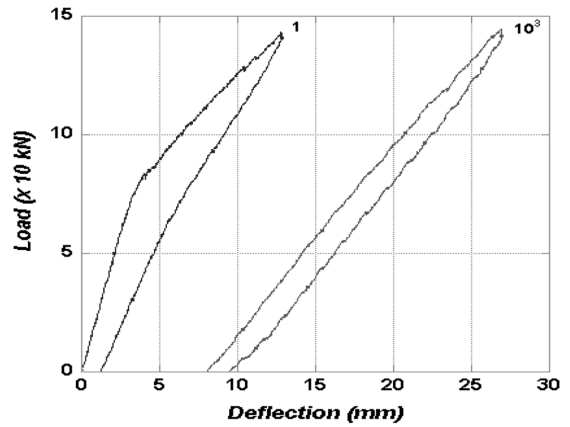


Fig. 19 L-D curves with the number of cycles (PSU80)

을 나타낸 그래프로서 하중 범위가 클수록 초기 최대 처짐 또한 크게 나타났으며, 반복 횟수가 증가할수록 최대 처짐량이 증가하였다.

3.4.2 PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 22는 반복 횟수에 따른 최대 처짐도를 나타낸 것이다. PSU 시험체의 경우 반복 하중 범위가 증가 할수록 최대 처짐량이 증가하는 것을 알 수 있었고, 하중 범위가 클수록 초기 반복 하중에 의해서 최대 처짐량이 증가하는 것을 알 수 있었다. PSU60, PSU65 시험체의 경우 반복 횟수에 따른 최대 처짐도는 초기 최대 처짐량은 조금씩 증가하였고, PSU70, PSU80 시험체는 높은 하중 범위로 인해서 초기 반복 횟수에서도 최대 처짐량이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

3.5 반복 횟수에 따른 변형률 관계

3.5.1 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 23은 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU60, PFU70, PFU80)의 반복 횟수에 따른 내부 FRP 긴장재의 변형률을 나타낸 것으로 반복 횟수가 증가함에 따라 FRP 긴장재의 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다. PFU80의 경우 초기 긴장력 도입 후의 변형률이 0.0066이었고, 파괴 전 정적 실험에서의 변형률이 0.0081로 전체 변형률이 1.47%로써 FRP 긴장재의 연신율(1.8%)에 가까웠고, 높은 하중 범위에서 균열부의 응력 집중으로 인해서 적은

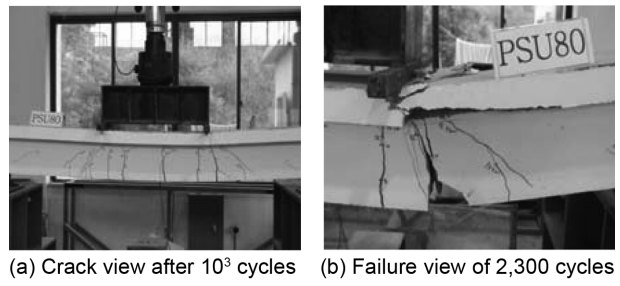


Fig. 20 Real view PSU80 specimens

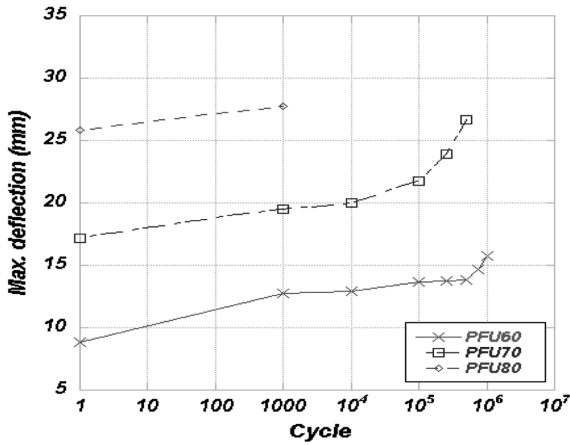


Fig. 21 Max. deflection curves with the number of cycles (PFU specimen)

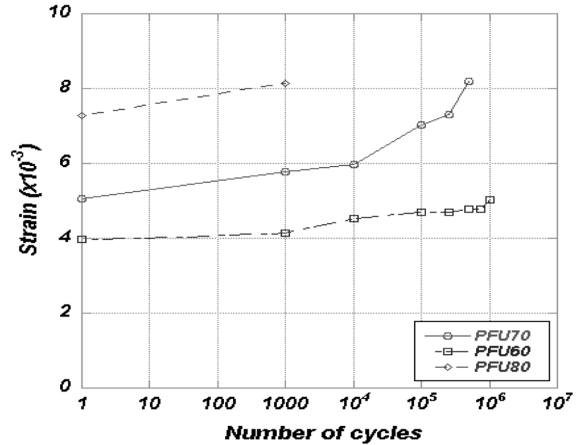


Fig. 23 Strain curves of FRP tendon with the number of cycles (PFU specimen)

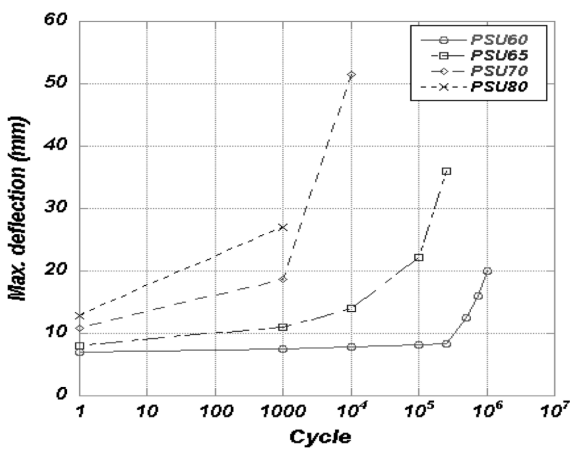


Fig. 22 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU specimen)

반복 횟수에서 긴장재가 파단되었다.

PFU70 시험체의 경우 약 65만회에서 인장부의 콘크리트 피복이 떨어지는 부분 부착 파괴를 보였으나, 100만회까지 긴장재의 변형률 또한 연신율과 비슷한 값을 나타낼 수 있었다. PFU60 시험체의 경우 100만회까지 변형률이 증가하는 하였으나 100만회까지 반복 하중에 의한 피로 파괴는 보이지 않았다.

3.5.2 PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 24는 PS 강연선을 이용한 시험체(PSU60, PSU65, PSU70, PSU80)의 반복 횟수에 따른 PS 강연선의 변형률을 나타낸 것이다. 모든 시험체에서 반복 횟수가 증가함에 따라 PS 강연선의 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다.

하중 범위가 가장 큰 PSU80 시험체의 경우 초기 긴장력 도입 후의 변형률이 0.0065이고, 파괴 전 정적 실험에서의 변형률이 0.0063으로 전체 변형률이 1.28%로 PS 강연선의 항복 변형률 4.32%보다 적게 나타났으나, 높은 하중 범위로 인해 초기 반복 횟수에서 콘크리트와 긴장재 사이의 부착력 저하가 발생하여 파괴되었다. PSU70 시험체와 PFU65 시험체의 경우 10³회, 10⁴회 이후에 콘

크리트와 긴장재 사이의 부착력 저하로 인하여 변형률이 증가하였고, 2만회와 26만회에서 부착 파괴를 보였다.

3.6 반복 횟수에 따른 균열 성장과 파괴 형태

3.6.1 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 25는 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU)의 반복 횟수 증가에 따른 균열 성장과 파괴 형태를 나타낸 것이다. 시험체의 대부분 균열은 초기 정적 실험에서 발생한 휨 균열이 반복 하중을 받는 동안 균열이 반복 횟수가 증가함에 따라 진전하였으며, 주로 하중이 작용하는 부근과 중앙부에 균열이 집중되어 발생하였다.

반복 하중 단계가 낮은 PFU60 시험체의 경우 초기 정적 하중으로 나타난 균열에서 주 균열로 진전되었지만, 반복 하중이 70%인 PFU70 시험체는 10³회까지는 균열 진전이 없었다. 10⁴회 이후 내부 긴장재 위치에서 가로 방향의 균열이 발생하였고, 약 65만회에는 인장부 콘크리트 피복이 떨어지는 부분 부착 파괴를 보였다. 그러나 100만회까지 콘크리트나 FRP 긴장재에 대해서 피로 파괴는 보이지 않았다. PFU80 시험체의 경우 초기 정적 실험

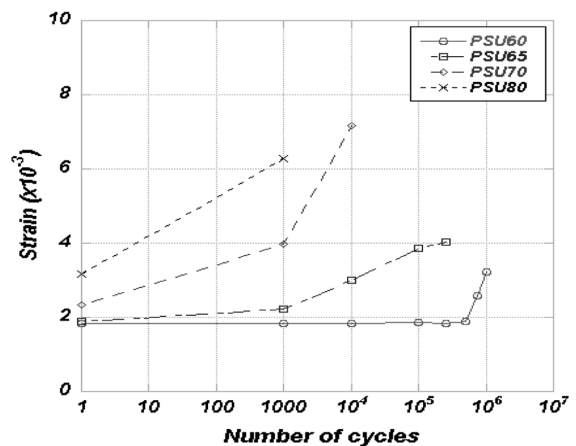


Fig. 24 Strain curves of FRP tendon with the number of cycles (PSU specimen)

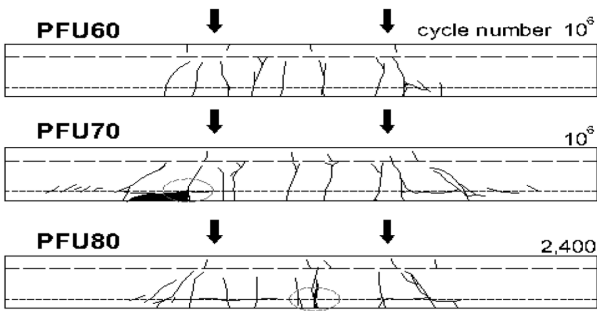


Fig. 25 Crack development pattern with the number of cycles (PFU specimen)

험 시 발생한 중앙부 균열부에서의 응력 집중으로 인해서 내부 FRP 긴장재가 파단 되었다. 내부 FRP 긴장재 파단으로 인한 파괴 시 긴장재 방향으로 가로 균열이 크게 발생하였다.

3.6.2 PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 26은 PS 강연선을 이용한 시험체(PSU)는 반복 횟수가 증가함에 따라 균열 성장과 파괴 형태를 나타낸 것이다. PSU 시험체에서의 대부분 균열은 PFU 시험체와 같게 초기 정적 실험에서 발생한 휨 균열이 반복 하중을 받는 동안 진전하였으며, 주로 중앙부에 균열이 집중되어 발생하였다.

PS 강연선을 이용한 시험체(PSU)의 경우 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU)와는 달리 콘크리트와 긴장재 사이의 부착 성능이 문제되어 반복 하중 범위가 큰 시험체의 경우 콘크리트와 긴장재의 부착 파괴가 빨리 발생하여 조기에 파괴를 보였다. 하중 범위가 낮은 시험체의 경우도 Fig. 26에서 나타난 것처럼 반복 횟수가 증가할수록 부착력 저하 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다.

파괴 형태를 비교하여 보면 FRP 긴장재를 이용한 시험체의 경우 반복 횟수에 따른 부분 부착 파괴 및 내부 FRP 긴장재의 파단으로 인한 파괴로 이어졌고, PS 강연선을 이용한 시험체의 경우 콘크리트와 긴장재 사이의 부착 파괴로 인한 콘크리트 압축 파괴로 이어졌다.

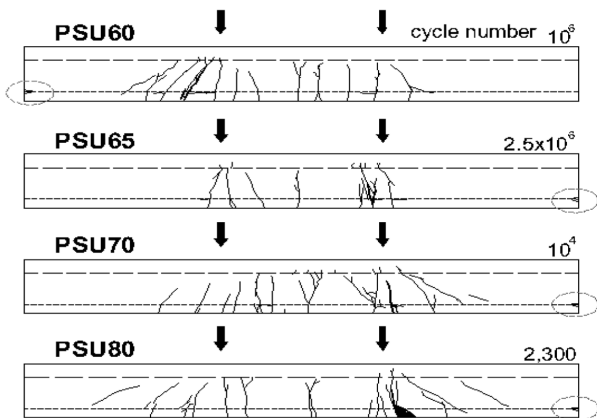


Fig. 26 Crack development pattern with the number of cycles (PSU specimen)

이 연구에서 사용한 PS 강연선의 부착성능이 FRP 긴장재의 부착성능보다 약하여 콘크리트와 PS 강연선 사이의 부착력 저하에 의한 부착 파괴를 보였다.

3.7 피로 강도 및 S-N 선도

콘크리트 구조물에서의 피로 한계는 각국 기준에 따라 약 100만회~200만회인 경우를 나타내고 있으며 이 연구에서는 100만회를 피로한계로 가정하였다. Fig. 27은 FRP 긴장재 프리스트레스트 콘크리트 보의 S-N 곡선을 나타낸 것이다. 실험 결과를 바탕으로 부재에 대한 피로 강도 관계식은 지수 형태의 함수로 나타낼 수 있으며 적용된 작용 응력 범위와 반복 회수의 관계식은 다음 식 (1)과 같다.⁷⁾

$$Y = B \times \log(X) + A \quad (1)$$

여기서, A와 B는 실험에 의하여 결정되는 상수이며, 계산상의 편의상 최소 하중 40%를 0으로 하고 100만회 내에 피로 파괴된 시험체에 대해 위의 식과 같은 형태로 바꾸어 실험 결과로부터 얻은 결과 값을 극한 하중에 대한 피로하중 백분율(Y)인 피로 강도와 피로 수명(X)의 관계를 회귀 분석하면 다음 Table 9와 같은 피로 강도 추정 식을 얻을 수 있다. 두 시험체 모두 극한 강도의 40%를 기준으로 최대 80% 사이의 범위에 대해서 피로 실험을 실시하였다. PFU 시험체의 경우 70%, 80%의 하중 범위에서 파괴되었다. S-N 곡선으로부터 반복 횟수 100만회에 대한 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU)의 피로 강도는 시험체의 극한강도의 약 69.2%이며 PS 강연선을 이용한 시험체(PSU)는 약 59.8%에 해당함을 알 수 있었다.

4. 결 론

이 연구는 내부 부착 FRP 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험을 통하여 사용 하중 상태에서 반복 하

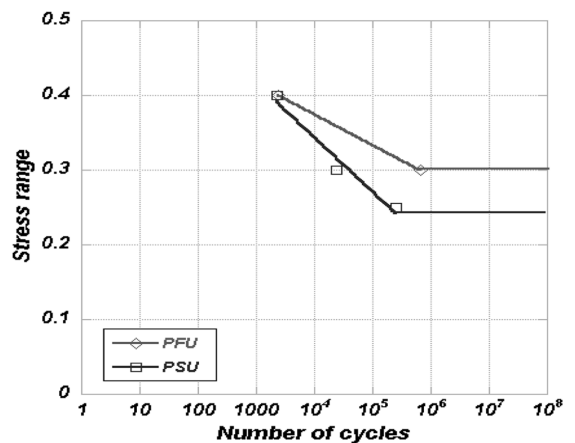


Fig. 27 S-N curve

Table 9 S-N relation

Parameter	S-N relation
PFU	$Y = 0.53959 - 0.041216 \log(x)$
PSU	$Y = 0.635367 - 0.07277 \log(x)$

중에 대한 내부 FRP 긴장재의 안전성을 파악하고, 피로 성능을 평가하였다. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험 결과 최소 하중 범위인 40~60%에 해당되는 시험체가 피로 파괴를 나타나지 않는 것으로 보아 사용 하중 상태에서의 반복 하중에 대해 안전한 것으로 나타났다.
- 2) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험 결과 시험체 모두 최대 하중 및 반복 횟수가 증가함에 따라 최대 처짐과 긴장재의 변형률이 증가하였다.
- 3) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로에 의한 균열 양상은 반복 횟수가 증가함에 따라 휨 균열이 확산되었고, 파괴 형태는 콘크리트 부착 파괴 및 균열부에서의 응력 집중으로 인한 내부 FRP 긴장재의 파단으로 나타났다.
- 4) 피로 실험 결과 피로한계 100만회에 대한 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 강도는 시험체의 극한 강도에 약 69.2%에 해당되었다.

요 약 최근 PS 강연선의 대체재로서 높은 인장강도와 훌륭한 내부식을 가진 FRP(fiber reinforced polymer)를 이용한 조사가 활발히 진행되어지고 있다. 따라서, 이 연구는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여 반복 하중에 따른 피로거동의 특성을 분석함으로써 프리스트레스트 콘크리트 보의 안전성을 평가하고자 하였다. 또한 기존 PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여 피로 성능을 비교하였다. 반복 하중은 정적 실험을 통해서 얻은 극한 하중의 40%를 최소 하중으로 일정하게 고정하고 최대 하중은 극한 하중의 60%, 70%, 80%로 결정하였다. 반복 하중은 4점 재하방식으로 sine파를 이용한 1~3 Hz의 속도 재하하였다. 피로한계는 100만회로 하였다. 40~60% 범위의 시험체는 100만회까지 피로 파괴가 나타나지 않았지만, 반복 횟수가 증가함에 따라 콘크리트와 긴장재 사이의 부착력이 저하되었고, 수평방향의 균열이 나타났다. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험 결과 사용 하중 상태에서의 반복 하중에 대해서 안전한 것으로 나타났다. 피로한계 100만회에 대한 피로 강도는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 경우 69.2%, PS 강연선을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보는 59.8%에 해당함을 알 수 있었다.

핵심용어 : FRP(fiber reinforced polymer), 피로, 프리스트레스트 콘크리트, S-N 곡선, 응력 범위

감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설핵심기술연구개발사업(2005~2008년)의 재정적 지원을 받은 “FRP 긴장재 및 정착장치의 개발과 활용을 위한 연구” 연구 결과 중 일부로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 조병완, 태기호, 최용환, 심재범, “CFRP 긴장재로 포스트 텐션된 프리스트레스트 콘크리트보의 파괴 실험,” 대한토목학회 논문집, 20권, 7호, 2000, pp. 639~642.
2. 심종성, 박성재, 강태성, 권동욱, 이기홍, “FRP 보강근을 사용한 콘크리트 휨부재의 정적 및 피로 특성에 대한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 313~316.
3. ACI 440.3R-04, *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*, 2004, pp. 20~22.
4. 안세희, 고상훈, 박종철, 김두환, “PSC Beam의 피로거동에 관한 연구,” 서울산업대학교 산업대학원 논문집, 7권, 2000, pp. 111~120.
5. 정상모, 이차돈, 박상렬, 조만영, Ye Kyaw, 정우태, “CFRP 긴장재로 프리스트레스트된 콘크리트 보의 피로 거동,” 한국구조물진단학회 봄 학술발표 논문집, 2006, pp. 51~56.
6. 건설기술연구원 외, “FRP 긴장재의 활용적 실용기술연구,” 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서, 2008, pp. 221~228.
7. 홍성룡, “FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 피로거동,” 제주대학교 석사학위 논문, 2008, pp. 50~53.