

강섬유보강 콘크리트의 휨피로 거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Flexural Fatigue Behavior of SFRC

최 의 규* 이 봉 학** 윤 경 구** 이 주 형***
Choi, Hyue-Kyu Lee, Bong-Hak Yun, Kyung-Ku Lee, Joo-Hyung

ABSTRACT

Potentially significant engineering advantages can be gained by the incorporation of steel fibers in tension-weak concrete. A variety of tests have been developed to measure and quantify the improvements achievable in steel fiber reinforced concrete. An objective of this study is to experimentally investigate the flexural fatigue behavior of steel-reinforced concrete with a experimental variables such as steel fiber types. To predict the behavior of steel fiber reinforced structural components under fatigue conditions

1. 서론

대부분의 구조물은 실제로 그 작용하중이 정적인 상태를 넘어서 동적 또는 반복하중 상태로 작용하는 경우가 많다. 특히 교량, 도로포장, 해양구조물등의 콘크리트 구조물들은 이러한 반복하중을 받는 대표적인 구조물들이다. 이러한 구조물들은 지속적인 반복하중에 의해 구조물내에 피로현상이 일어나게 되며, 피로현상은 피로파괴를 유발하는 직접적인 원인이 된다. 현재 콘크리트 구조물의 피로 연구는 반복하중을 받는 콘크리트 교량, 도로등의 파손 및 파괴가 일어남에 따라 부재의 피로저항성에 관심을 갖게됨에 따라 활발히 진행되고 있다. 최근 국내에서도 기존 교량에 대한 안전진단 및 내하력에 대한 조사를 실시하고 있는 실정이며, 실제로 많은 교량들이 차량의 반복하중으로 인한 피로 손상의 문제가 대두되고 있다. 현재까지 비교적 많은 연구자들에 의해서 콘크리트피로에 대한 연구는 활발히 진행되어왔다. 그러나 강섬유 보강콘크리트는 재료 자체가 합성재료로 거동자체가 매우 복잡하기 때문에 피로연구가 다소 미흡하다고 할 수 있다. 또한 기존의 연구들은 부재에 초기균열(Notch)을 줌으로써 파괴역학적 측면에서 접근하는 방법을 사용하여왔다. 그러나 실제 구조물들은 초기균열이 없는 즉, 무손상 부재라 할 수 있는데 이러한 무손상 부재에 대한 피로연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 현재 국내에서 생산되는 강섬유를 이용하여 강섬유 혼입율에 따른 강섬유 보강콘크리트의 특성을 비교, 분석하고 피로특성 평가 및 피로수명을 예측하고자 한다.

2. 실험

2.1 콘크리트 배합 및 사용재료

- * 정회원, 승화 E&C
- ** 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수
- *** 정회원, 강원대학교 산업기술연구소 연구원

본 연구에서 사용된 강섬유는 국내 C사의 $\phi 30 \times 0.5\text{mm}$, $50 \times 0.6\text{mm}$ 의 양단 Hooked형 강섬유를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 1과 같다. 국내 H사 제품의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 최대치수 19mm인 쇄석(비중 2.61, FM 6.83) 과 홍천강모래(비중 2.60, FM 2.82)를 사용하였다. 또한 강섬유의 혼입량의 증가에 따른 워커빌리티를 확보하기 위해 비중 1.20 ± 0.05 의 유동화제를 첨가하여 목표슬럼프 $22 \pm 2\text{cm}$ 의 작업성을 확보하였다. 실험변수인 강섬유의 혼입량을 0%에서 1.5%까지 강섬유의 혼입량을 단위체적당 골재의 체적에 대하여 치환하였다. 이상과 같은 콘크리트의 배합은 Table 2와 같다

Table 1. Physical Properties of Steel Fibers

Fiber Type	Fiber Aspect (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Specific Gravity	Tensile Strength (kgf/cm^2)
Hooked	$\phi 30 \times 0.5$	60	7.85	10,646
Hooked	$\phi 50 \times 0.6$	83	7.85	10,646

주) Young's Modulus(kgf/cm^2) : 2.9

Table 2. Concrete Mix Proportion of Test Series

Fiber Type	W/C (%)	S/a (%)	V _f (%)	Unit Weight(kg/m^3)						
				W	C	S	G	S.F	S.P	
Plain	45	60	0	202	449	997	682	---	3.59	
				0.4	202	449	991	678	31.4	3.59
				0.7	202	449	986	675	55.0	3.59
				1.0	202	449	981	672	78.5	3.59
				1.5	202	449	973	666	117.8	3.59

주) S.F : Steel Fiber, S.P : Super Plasticizer

2.2 시험체제작

시편의 크기는 휨강도, 휨인성, 휨피로 시험을 위한 시험체는 $10 \times 10 \times 35\text{cm}$ 로 하였으며 압축 및 인장시험편은 시방서규정에 의해 강섬유의 길이가 40mm를 넘는 경우 즉, Hooked형 50mm는 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 원형몰드를 사용하여 강섬유 길이가 40mm 이하인 경우는 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 원형몰드를 사용하였으며 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Number of specimens for using test

Test Series	Dimension (cm)	Fiber length (mm)
Compressive Strength	$\phi 10 \times 20$	30
	$\phi 15 \times 30$	50
Splitting Tensile Strength	$\phi 10 \times 20$	30
	$\phi 15 \times 30$	50
Flexural Strength	$10 \times 10 \times 35$	30, 50
Flexural Toughness	$10 \times 10 \times 35$	30, 50
Flexural Fatigue	$10 \times 10 \times 35$	30, 50
Cumulative Damage	$10 \times 10 \times 35$	30, 50

2.3 시험방법

본 연구에서 강섬유보강 인성평가방법을 JCI-SF 4에 준하여 휨인성을 평가하였다. 강섬유보강 콘크리트의 피로시험은 ACI 544에서 언급한 방법에 준하여 실험을 수행하였다. 피로에 대한 응력수준은 정적 극한강도에 대한 최대 응력비로 60,70,80,90%로 변화를 주었으며 응력비는 최대응력에 대한 최소응력의 비이며 0.1로 고정하였다. 누적손상시험은 피로실험에서 얻어진 S-N곡선을 기초로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 휨인성 결과

휨인성시험을 3등분점으로 시험하여 유형별 하중-처짐곡선을 Fig. 1에 나타내었다. 초기균열 후 Plain 콘크리트는 매우 취성적인 거동을 나타내며 파괴되었으며 강섬유보강 콘크리트는 초기균열이 발생하기 전에는 선형적인 거동을 보이다 균열발생 후 비선형적인 거동과 연성적인 거동을 나타냈다.

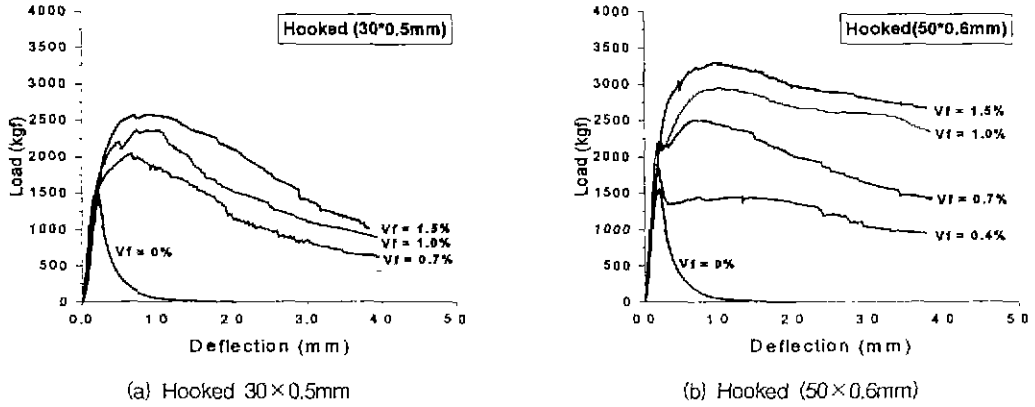


Figure 1. Load-Deflection Curve of Hooked fiber(30x0.5mm and 50x0.6mm)

3.2 피로시험 결과

본 연구에서 실험한 강섬유보강 콘크리트의 200만회에서의 정적극한강도에 대한 휨피로 수명을 살펴보면, Plain 콘크리트는 약 57.3%정도, 강섬유 보강콘크리트는 약 61~67% 정도를 나타냈다. 또한 Hooked(60)형 섬유는 피로수명 61.2~63.7%, Hooked(83)형 섬유는 61.6~66.4%의 피로수명을 Fig. 2에 나타냈다. 본 연구결과 예상 피로수명은 극한강도의 약 65%정도의 수준으로 나타났다.

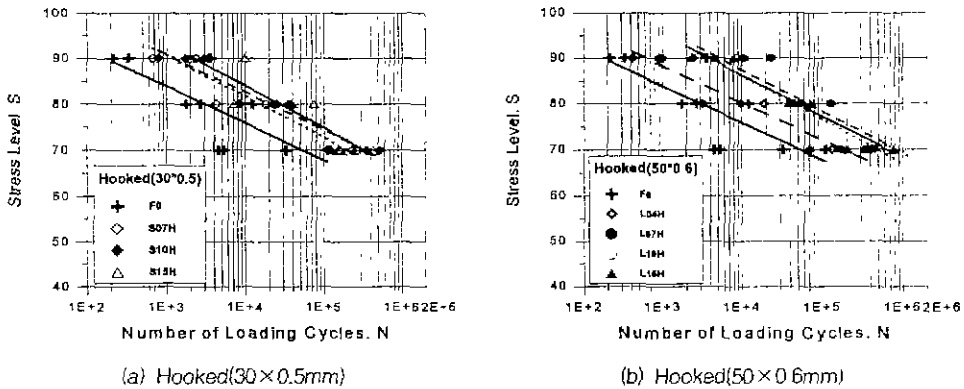


Figure 2. S-N Curve of SFRC by Various Fiber Contents

3.3 누적손상관계

본 논문에서는 저응력과 고응력시 누가손상에 미치는 영향을 파악하기 위하여 응력수준에 대한 반복비를 $n1/N1=0.2$ 로 고정하였다. 그 이후에는 응력수준을 저응력에서 고응력 또는 고응력에서 저응력으로 변경하여 시험체가 파괴될 때까지의 반복회수를 측정하였으며 연구에서 사용된 입력자료 및 실험 결과를 Table 4와 5에 나타내었다.

Table 4. Result of cumulative damage(0.7→0.9)

Type	Cycles at N ₁			Cycles at N ₂		Aver. n ₂ /N ₂	Σ $\frac{n}{N}$
	n ₁ /N ₁	N ₁	n ₁	n ₂	n ₂ /N ₂		
F0	0.2	53,234	10,647	414	2.35	2.65	2.85
				126	0.72		
				858	4.88		
S07H	0.2	204,697	40,939	2,248	1.94	3.44	3.64
				1,497	1.29		
				8,236	7.09		
S10H	0.2	340,609	68,122	897	0.72	3.75	3.95
				5,423	4.32		
				7,784	6.21		
S15H	0.2	336,908	67,382	1,887	0.85	2.56	2.76
				6,698	3.00		
				8,547	3.83		
L04H	0.2	182,255	36,451	2,599	4.17	2.23	2.43
				881	1.41		
				690	1.11		
L07H	0.2	630,708	126,142	3,998	1.02	2.78	2.98
				18,907	4.82		
				9,854	2.51		
L10H	0.2	815,630	163,126	15,664	2.98	2.21	2.41
				1,723	0.33		
				17,457	3.32		
L15H	0.2	479,190	95,838	6,784	1.70	2.49	2.69
				8,467	2.12		
				14,536	3.64		

Table 5. Result of cumulative damage(0.9→0.7)

Type	Cycles at N ₁			Cycles at N ₂		Aver. n ₂ /N ₂	Σ $\frac{n}{N}$
	n ₁ /N ₁	N ₁	n ₁	n ₂	n ₂ /N ₂		
F0	0.2	176	35	10,544	0.20	0.42	0.62
				9,660	0.18		
				46,752	0.88		
S07H	0.2	1,161	232	51,480	0.25	0.46	0.66
				156,023	0.76		
				74,865	0.37		
S10H	0.2	1,254	251	49,568	0.15	0.50	0.70
				328,514	0.96		
				128,948	0.38		
S15H	0.2	2,230	446	159,115	0.47	0.85	1.05
				475,284	1.41		
				226,254	0.67		
L04H	0.2	623	125	141,607	0.78	0.42	0.62
				57,758	0.32		
				30,079	0.17		
L07H	0.2	3,926	785	170,321	0.27	0.51	0.71
				335,240	0.53		
				455,729	0.72		
L10H	0.2	5,259	1,052	262,663	0.32	0.58	0.78
				172,913	0.21		
				974,519	1.19		
L15H	0.2	3,988	798	154,235	0.32	0.63	0.83
				268,984	0.56		
				489,567	1.02		

4. 결론

본 연구에서는 강섬유 보강의 휨피로 거동에 대한 실험적 연구로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 강섬유의 혼입으로 콘크리트의 취성적 거동을 연성적 거동으로 변화시킴을 알 수 있었다.
- (2) 콘크리트에 섬유를 혼입함으로써 영구변형에 손실되는 에너지가 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 섬유혼입량에 관계없이 강섬유 형상비가 클수록 동일 응력수준에서 훨씬 큰 비탄성변형에너지를 나타냈다.
- (4) 무근 콘크리트 뿐 아니라 강섬유 보강콘크리트에서도 역시 Miner의 선형 누가손상이론이 성립하지 않는다는 것을 알 수 있었다.
- (5) 고응력에서 저응력으로 피로를 받는 경우보다 저응력에서 고응력으로 피로를 받는 경우가 피로수명이 훨씬 크게 나타남을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Vellore S. Gopalaratnam and Surendra P. Shah, "Tensile Failure of Steel-Reinforced Mortar", Journal of Engineering Mechanics, Vol.113, No. 5, May, 1987
2. Nianzhi Wang, Sideney Mindess and Keith Ko, "Fiber Reinforced Concrete Beams Under Impact Loading", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 3, pp. 363~376, 1996

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터의 지원에 의해 연구되었음