

강섬유보강콘크리트의 휨 피로거동에 관한 연구

Flexural Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Structures

장 동 일* 채 원 규** 손 영 현***
Chang, Dong Il Chai, Won Kyu Son, Young Hyun

요 약

본 논문에서는 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비에 대한 강섬유보강콘크리트의 휨 피로거동을 분석하기 위하여 일련의 강섬유보강콘크리트 시험체에 대하여 피로실험을 수행하였다. 피로실험은 3점 휨 실험법으로 실시하였으며, 실험시 각 시험체의 하중반복회수에 대한 중앙처짐과 피로파괴시의 반복회수를 조사하였다. 이들 실험 결과를 토대로 반복회수에 대한 강섬유보강콘크리트의 중앙처짐, 비탄성변형에너지 및 탄성변형에너지등을 비교 분석하였으며, 강섬유보강콘크리트의 S-N선도를 작도하였다.

연구 결과, 강섬유 혼입량이 클수록 영구 변형에 손실되는 에너지가 크게 감소하고, 균열 확대에 소모되는 에너지가 증가하였으며, 동일한 강섬유 혼입량을 갖는 강섬유보강콘크리트의 경우 강섬유 형상비가 클수록 탄성변형에너지는 작았다. 아울러 본 피로실험 결과를 회귀분석하여 구한 S-N선도에 의하면 강섬유 혼입량이 1.0%인 강섬유보강콘크리트의 반복회수 200만회에 대한 피로강도는 초기균열 발생시의 정적강도의 약 70%로 나타났다.

Abstract

In this thesis, the fatigue tests were performed on a series of SFRC(steel fiber reinforced concrete) to investigate the fatigue behavior of SFRC varying with the steel fiber contents and the steel fiber aspect ratios. The three point loading system is used in the fatigue tests. In these tests, relations between the repeated loading cycles and the mid-span deflections, number of repeated loading cycles when specimen was fractured were observed. On this basis, the mid-span deflections, the elastic strain energy and inelastic strain energy of SFRC were studied. A S-N curve was drawn to present the fatigue strength of SFRC beam.

From the test results, by increasing the steel fiber content the energy lost on the permanent deformation decreases and the energy spent on crack growth increases. But in case of SFRC with the same steel fiber content the higher the steel fiber aspect ratio is, the less the elastic strain energy is. According to S-N curve drawn by the regression analysis on the fatigue test results, the fatigue strength with 2,000,000 repeated loading cycles in SFRC with the steel fiber content is 1.0% shows about 70% on the first crack static flexural strength.

* 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
*** 한양대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

key words : fatigue test, SFRC, fiber content, fiber aspect ratio, repeated loading cycles, mid-span deflection, strain energy, S-N curve, fatigue strength

1. 서론

1.1 연구 배경

일반적인 피로실험 결과는 S-N(응력-하중반복회수) 선도로 표시되며, 이 S-N선도가 하중반복회수 N축과 평행한 점근선을 가지게 되면, 이에 대응하는 응력값을 피로한도라고 한다. 대부분의 금속들은 이러한 피로한도를 가지지만, 콘크리트나 모르타르같은 취성재료는 피로파괴의 역학적 거동이 복잡하게 진행되기 때문에 금속과 달리 미리 정한 반복회수에 대한 피로강도를 사용하고 있다.⁽¹⁾

콘크리트나 모르타르에 대한 피로파괴 현상은 크게 다음과 같은 세가지 단계로 발전된다고 추측되고 있다.⁽²⁾ 첫째는 결함 또는 균열이 시작되는 단계로서, 이 단계는 콘크리트 구조체 속에 존재하는 기공이나 골재와 시멘트풀 사이의 약하거나 부착되지 않은 부분등으로 이루어지는 결함으로, 콘크리트 배합시 나타나는 고유의 성질을 말한다. 둘째는 한계크기에 대한 결함 또는 균열의 느린 성장 단계로서 콘크리트와 같은 이질적인 재료 안에서 일어나는 복합적인 성질을 말한다.⁽³⁾ 이러한 미세 균열화라고 불리는 콘크리트의 정적 하중 상태하에서 결함 성장은 통계적으로 응력 영역안에서 결함의 모양, 크기, 배향상태에 따라 한계크기까지 안정된 크기로 느리게 진전한다.

⁽⁴⁾ 이 이후에는 이러한 결함 또는 균열이 급하게 성장하게 되며 이를 셋째 단계인 한계크기에 대한 결함 또는 균열의 빠른 성장 단계라고 한다. 즉 불안정한 균열들이 충분히 생기면 연속된 균열로 연결되고 최종적으로 구조체의 급작스런 파괴를 발생시킨다. 이러한 콘크리트의 단계별 피로파괴는 규모가 큰 구조체에서는 어느 정도의 시간을 두고 일어나지만, 구조체가 충분히 작은 규모일 때는 이들 단계가 잇달아 일어난다.

실제적으로 콘크리트의 피로파괴의 단계중 첫번째와 세번째의 단계는 조절할 수 있는 방법이 거의 없다. 그러나 콘크리트나 모르타르에 불규칙적으로 분산된 강섬유를 보강하는 것으로 두번째 파괴 단계인 결함 또는 균열의 성장을 늦추거나 억제할 수 있는 가능성은 있다. Romualdi 와 Batson⁽⁵⁻⁶⁾은 모르타르에 강섬유를 보강함으로써

결함과 균열의 성장을 늦출 수 있고 정적 휨 강도가 증진된다고 하였다. 이들 연구에서 강섬유의 혼입으로 강섬유가 없는 경우의 콘크리트가 파괴되는 하중강도에서 결함의 성장을 억제할 수 있으며, 강섬유에 의해 무근 콘크리트보다 범위가 커진 한계크기 내에서 결함이 느리게 성장하는 동안 정적실험에서 파괴될 때 필요한 하중보다 작은 하중을 반복적으로 재하할 수 있음을 알 수 있다.

이상의 연구들에서, 반복하중을 받는 콘크리트에서 결함의 성장이 강섬유를 사용함으로써 감소될 수 있다는 것과 강섬유에 의해 더 큰 피로강도를 나타낼 수 있다는 것이 확실하다.

1.2 연구목적

본 논문에서는 강섬유 혼입에 대한 강섬유보강콘크리트의 피로하중하의 거동을 규명하기 위하여 일련의 강섬유보강콘크리트 시험체에 대하여 피로실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험체는 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비를 변수로 하여 계획하였으며, 실험시 이들 변수가 강섬유보강콘크리트의 피로거동에 미치는 강도 증대 효과를 고찰하고자 하였다. 피로실험은 3점휨 실험법으로 실시하였으며 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 중앙처짐을 조사하여 반복회수와 중앙처짐과의 관계를 비교 분석하였으며, 피로파괴시의 반복회수를 관찰하여 강섬유보강콘크리트의 피로강도를 결정하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용재료

2.1.1 강섬유

본 실험에서는 직경이 0.6mm이며, 길이가 36mm, 48mm, 60mm인 단상의 원형 강섬유를 사용하였으며, 강섬유의 재료적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2 콘크리트

콘크리트 배합시 시멘트는 현재 현장에서 주로 사용되고 있는 S사 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 화학

Table 1. Material properties of steel fiber.

직경(D)(mm)	길이(L)(mm)	형상비(L/D)	밀도(g/cm ³)	탄성계수(kgf/cm ²)	인장강도(kgf/cm ²)
0.6	36,48,60	60,80,100	7.85	2,020,000	2,110~2,400

Table 2. The chemical components and physical properties of cement.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O(%)	K ₂ O(%)	간열감량(%)	비중	비표면적(m ² /g)
20.8	6.3	3.2	62.1	3.3	2.3	0.12	0.8	1.0	3.12	3200

Table 3. Mix proportion of concrete.

굵은골재의 최대치수(mm)	슬럼프의 범위(cm)	공기량의 범위(%)	물시멘트비 W/C(%)	잔골재율 (%)	단위량(kgf/m ³)			
					물	시멘트	잔골재	굵은골재
19	10	2.0	38.4	45	185	482	752	936

적 성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다. 골재는 비중이 각각 2.65, 2.60인 강자갈, 강모래를 사용하였으며, 최대치수를 19mm로 하였다. 콘크리트의 배합설계표는 Table 3과 같다.

2.2 시험체

보 시험체는 10×10×60cm로 일정하게 제작하였으며, 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%, 1.5%, 강섬유 형상비가 60, 80, 100인 시험체를 실험에 사용하였다. 시험체 제작시 중력식 믹서를 사용하였고, 섬유분침 현상이 생기지 않도록 강섬유를 조금씩 뿌려 넣어가면서 혼합하였다.

2.3 실험방법 및 측정

피로실험의 재하는 25ton 용량의 피로시험기를 사용하였으며, 단진재하로 하였다. 피로실험시 최소 반복하중은 0kgf으로 일정하게 하였으며, 최대반복하중은 정적 초기균열발생시하중의 70%~85%로 하였다. 이때 정적 초기균열발생시하중은 별도의 정적실험에 의하여 구하였으며, 시험체 하단에 부착한 콘크리트 스트레인 게이지의 파손에 의하여 측정 할 수 있었다. 각 시험체 종류의 최대반복하중에 대한 정적 초기균열발생시하중 백분율은 Table 4와 같다.

Table 4. The percentage of first static flexural cracking strength.

강섬유혼입량(%)	강섬유 형상비	P_u	$P_{f,crack}/P_u$
0.5	80	800	0.75
1.0	80	865	0.70~0.85
1.5	80	900	0.75
1.0	60	815	0.75
1.0	100	930	0.75

여기서 P_u 는 정적 초기균열발생시하중, $P_{f,crack}$ 은 최대반복하중이다.

재하시 반복회수 10회까지는 정적으로 재하하였으며, 그 이후 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하면서 10Hz의 속도로 재하하였다. 실험시 보 시험체의 중앙하단에 콘크리트 스트레인 게이지와 처짐측정기를 설치하여 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 균열 성장과정 및 중앙처짐을 측정하였으며, 아울러 피로파괴시의 반복회수를 관찰하였다. 피로실험의 개략도는 Fig. 1과 같다.

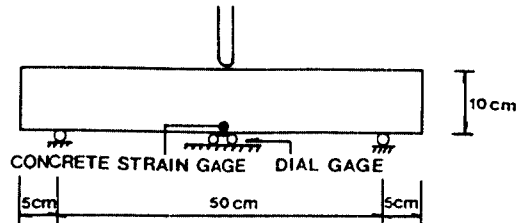


Fig.1 The general view of fatigue tests.

3. 결과분석 및 고찰

3.1 반복회수와 중앙처짐의 관계

Fig.2~Fig.5에 최대반복하중이 정적 초기균열발생시하중의 75%인 경우에 대하여 강섬유 혼입량, 강섬유 형상비 별로 반복회수에 대한 중앙처짐을 각각 나타내었다. Fig.2에서 강섬유보강콘크리트의 중앙처짐은 반복회수가 커짐에 따라 증가하였지만, 파괴직전에는 일정한 한계값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig.3에 나타나 있듯이 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%일 때는 강섬유 혼입량이 1.5%일 때보다 급격히 파괴가 이루어지고 있으며,

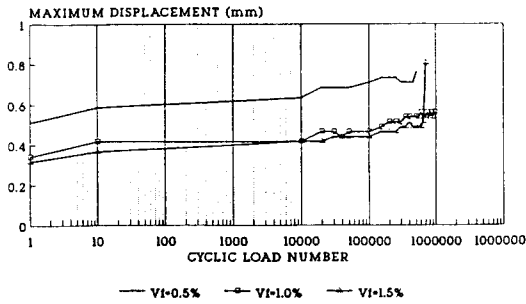


Fig.2 The relationship between number of repeated loading cycles and mid-span deflection for the fiber content.

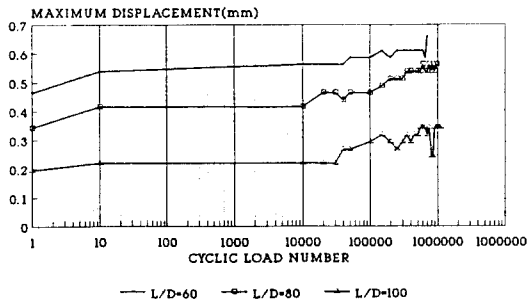


Fig.4 The relationship between number of repeated loading cycles and mid-span deflection for fiber aspect ratio.

이로써 강섬유 혼입량이 증가할수록 강섬유보강콘크리트의 연성이 높아짐을 알 수 있다. 한편 Fig.4와 Fig.5에서 강섬유 형상비가 60, 80, 100인 시험체의 정적하중 재하시의 최대 중앙처짐은 각각 0.464mm, 0.342mm, 0.195mm였으며, 파괴직전 측정된 최대 중앙처짐은 각각 0.610mm, 0.561mm, 0.342mm로 나타났다. 즉 강섬유 혼입량이 동일한 조건 하에서는 강섬유 형상비가 작을수록 완만한 파괴가 이루어지며 강섬유보강콘크리트의 취성 파괴 억제능력이 커짐을 알 수 있다.

한편 본 연구에서는 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 영구변형에 손실되는 에너지와 균열확대에 의한 균열에 주어지는 에너지의 변화를 알아보기 위하여, 비탄성변형에너지와 탄성변형에너지를 하중-처짐 선도의 면적을 이용하여 계산하였으며, 이들 결과를 강섬유 형상비와 강섬유 혼입량 별로 비교하여 각각 Table 5와 Table 6에 정리하였다.

상기 표에서 정적하중 재하시(N=1) 강섬유보강콘크리트의 비탄성변형에너지는 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%, 1.5%일 때 각각 125.0kgf·mm, 49.4kgf·mm, 52.4

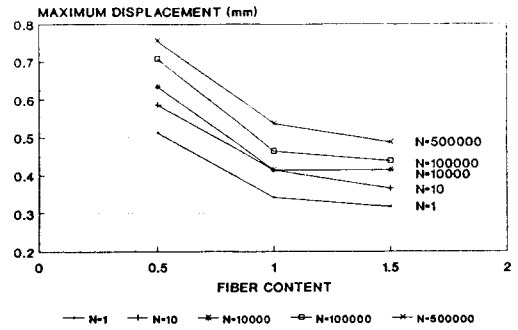


Fig.3 The relationship between fiber content and mid-span deflection.

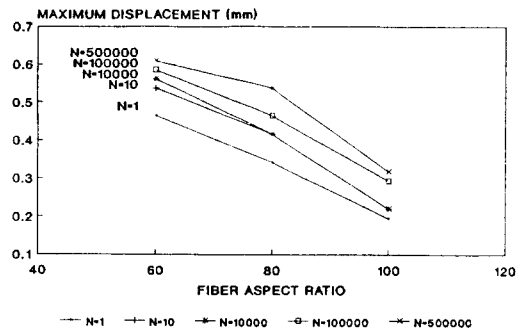


Fig.5 The relationship between fiber aspect ratio and mid-span deflection.

kgf·mm로서, 강섬유 혼입량이 1.0% 이상인 경우 정적하중에 의한 영구변형에 소모되는 에너지가 크게 감소함을 알 수 있다. 반복회수가 증가함에 따라 강섬유보강콘크리트의 비탄성변형에너지는 급격히 감소하였으며, 반복회수가 1만회일 때는 정적하중 재하시의 값에 비하여 강섬유 혼입량이 0.5%인 시험체는 약 4%로, 강섬유 혼입량이 1.0~1.5%인 시험체는 약 9~14%로 감소하였다. 이들 결과에서 강섬유 혼입량이 1.0% 이상인 강섬유보강콘크리트는 반복하중의 초기재하 단계에서는 영구변형에 소모되는 에너지가 적었지만, 반복회수가 증가하여도 꾸준히 영구변형을 일으키고 있음을 알 수 있다. 한편 정적하중 재하시 강섬유보강콘크리트의 탄성변형에너지는 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%, 1.5%일 때 각각 48.7kgf·mm, 40.5kgf·mm, 52.4kgf·mm로 크게 변화가 없었지만, 파괴직전의 탄성변형에너지는 각각 49~60kgf·mm, 60~72kgf·mm, 66~76kgf·mm로서 강섬유 혼입량이 클수록 증가하였다. 따라서 강섬유 혼입량이 클수록 파괴직전 균열확대에 소모되는 에너지가 크게 증가함을 알 수 있다.

Table 5. The relationship between fiber content and strain energy.

[단위 : kgf · mm]

반복회수 N	V _f =0.5%		V _f =1.0%		V _f =1.5%	
	I	U	I	U	I	U
1	125.00	48.70	49.40	40.50	52.40	52.40
10	3.60	69.60	7.40	62.90	1.20	64.00
10000	4.90	68.60	6.80	38.40	4.80	77.00
20000	0.10	82.20	4.90	50.00	0.45	72.80
30000	*	69.10	6.15	56.90	4.90	84.10
40000	4.19	59.80	0.50	40.40	6.15	76.70
50000	*	54.90	3.00	51.80	*	72.50
100000	2.40	61.00	2.40	57.50	7.20	68.90
150000	6.15	67.90	*	60.40	*	85.00
200000	*	70.40	*	74.20	16.40	66.80
250000	*	72.80	*	67.60	16.40	69.30
300000	*	62.50	*	66.10	6.00	55.20
350000	*	59.70	*	72.10	4.90	53.90
400000	*	57.60	7.20	67.90	2.50	63.40
450000	*	49.30	--	--	1.80	63.50
500000	--	--	6.15	65.30	*	75.70
550000	--	--	*	64.20	*	66.50
600000	--	--	*	71.90	0.65	66.40
650000	--	--	2.98	55.10	15.80	--
700000	--	--	*	57.60	--	--
750000	--	--	*	89.50	--	--
800000	--	--	4.20	53.30	--	--
850000	--	--	3.10	60.20	--	--
900000	--	--	4.90	72.00	--	--
950000	--	--	13.50	63.90	--	--

여기서, --표는 측정되지 않은 결과를 말하며, * 표는 비탄성 변형에너지의 값이 0.01 미만인 결과를 나타낸다. 또한 I는 비탄성 변형에너지를, U는 탄성변형에너지를 표시한다.

상기 표에서 알 수 있듯이 강섬유보강콘크리트의 비탄성 변형에너지는 강섬유 혼입량 뿐만 아니라, 강섬유 형상 비에도 크게 영향을 받고 있다. 정적하중 재하시 강섬유 보강콘크리트의 비탄성변형에너지는 강섬유 형상비가 60, 80, 100일 때 각각 98.8kgf · mm, 49.4kgf · mm, 24.4kgf · mm로서, 강섬유 형상비가 증가함에 따라 큰 폭으로 감소하였다. 이러한 양상은 반복회수가 10만회 일 때까지 계속 유지되었으며, 그 이후 파괴직전까지는 작은 값을 갖고 있다. 이들 결과에서 강섬유보강콘크리트의 영구변형에 소모되는 에너지는 강섬유 형상비가 클수록 그 값이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다. 한편 강섬유 형상 비의 변화에 대한 강섬유보강콘크리트의 탄성변형에너지는 정적하중 재하시 강섬유 형상비가 60, 80, 100일 때 각각 45.3kgf · mm, 40.5kgf · mm, 34.0kgf · mm로서 강섬유

Table 6. The relationship between fiber aspect ratio and strain energy.

[단위 : kgf · mm]

반복회수 N	L/D=60		L/D=80		L/D=100	
	I	U	I	U	I	U
1	98.80	45.30	49.40	40.50	24.40	34.00
10	19.00	46.40	7.40	62.90	7.34	25.50
10000	0.10	52.30	6.80	38.40	0.01	20.70
20000	9.20	49.80	4.90	50.00	6.02	19.50
30000	7.50	51.60	6.15	56.90	*	21.90
40000	3.02	41.30	0.50	40.40	2.40	41.50
50000	4.90	54.50	3.00	51.80	8.52	43.60
100000	9.30	39.90	2.40	57.50	*	50.20
150000	*	64.80	*	60.40	*	45.30
200000	*	58.20	*	74.20	*	50.30
250000	*	61.60	*	67.60	0.10	30.30
300000	*	57.40	*	66.10	*	44.10
350000	0.10	56.80	*	72.10	0.20	49.80
400000	*	61.70	7.20	67.90	0.10	39.20
450000	6.70	54.90	--	--	*	48.70
500000	*	64.10	6.15	65.30	*	41.40
550000	*	69.00	*	64.20	4.90	50.30
600000	*	64.10	*	71.90	0.10	--
650000	*	60.70	2.98	55.10	--	--
700000	4.90	73.90	*	57.60	--	--
750000	--	--	*	89.50	--	--
800000	--	--	4.20	53.30	--	--
850000	--	--	3.10	60.20	--	--
900000	--	--	4.90	72.00	--	--
950000	--	--	13.50	63.90	--	--
1000000	--	--	--	--	2.50	50.30
1500000	--	--	--	--	*	38.80
2000000	--	--	--	--	7.30	45.40

여기서, --표는 측정되지 않은 결과를 말하며, * 표는 비탄성 변형에너지의 값이 0.01 미만인 결과를 나타낸다. 또한 I는 비탄성 변형에너지를, U는 탄성변형에너지를 표시한다.

형상비가 작을수록 큰 값을 나타냈으며, 피로파괴 직전에도 각각 61~74kgf · mm, 60~72kgf · mm, 39~50 kgf · mm로서 같은 양상을 나타내고 있다. 따라서 강섬유보강콘크리트의 균열확대에 소모되는 에너지는 강섬유 형상비가 클수록 적어짐을 알 수 있으며, 이러한 결과는 강섬유 형상비가 크다는 것이 동일한 혼입량 때 강섬유의 개수가 적다는 것을 의미하므로 강섬유보강콘크리트의 균열확대에 소모되는 에너지를 증가시키기 위해서는 소수의 긴 강섬유보다는 다수의 짧은 강섬유의 사용이 효과적임을 알 수 있다.

3.2 S-N 선도

본 연구에서는 강섬유보강콘크리트의 피로강도를 알아보기 위하여 강섬유 혼입량이 1.0%인 시험체에 대하여 피로실험시 최대반복하중을 정적 초기 균열발생시 하중의 70%~85%로 계획하였으며, 피로파괴시의 반복회수를 측정하였다. 피로실험 결과를 회귀분석하기 전에, 파괴된 시험체의 파단면을 육안으로 관찰하였으며, 이들 시험체 중 섬유문침 현상이 있거나 섬유의 분산상태가 일정하지 않은 시험체의 자료들은 삭제하였다. 피로실험 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Fatigue test result.

P_{max}/P_u	N	비	고
0.85	1,760*	배합상태 불량	
0.85	111,380		
0.85	114,010		
0.80	1,540*	배합상태 불량	
0.80	310,300		
0.80	342,280		
0.75	710,020		
0.75	970,060		
0.75	998,200		
0.70	1,208,370		
0.70	2,000,000*	200만회 이상	
0.70	2,000,000*	200만회 이상	

여기서 P_{max}/P_u 는 최대반복하중에 대한 정적 초기균열발생시 하중 백분율, N은 하중반복회수이며, * 표는 회귀분석에서 제외된 자료를 표시한다.

일반적으로 피로실험 결과는 피로수명과 피로강도와와의 관계식으로 표현되는데 다음과 같은 지수형태의 함수로 나타낼 수 있다.

$$R = K \cdot \exp(-C \cdot \log N)$$

여기서, R은 피로강도, N은 피로수명, K와 C는 실험상수이다. 상기식의 양변에 대수를 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$\log R + C \cdot \log e \cdot \log N = \log K$$

그러므로 $\log R = \alpha$, $C \cdot \log e = \beta$, $\log K = Y$ 로 놓으면 상기식은 다음과 같은 식으로 치환될 수 있다.

$$Y = \alpha + \beta \cdot \log N$$

Table 7의 피로실험 결과를 회귀분석에 의해 다음과

같은 직선식으로 나타낼 수 있었다.

$$R = 147.92 - 12.40 \log N$$

상기 직선식은 Fig.6에 나타내었으며, 반복회수 2,000,000회에 대한 강섬유보강콘크리트의 피로강도는 강섬유 혼입량이 1.0%일 때 정적 초기균열발생시 하중의 약 70%로 나타났다.

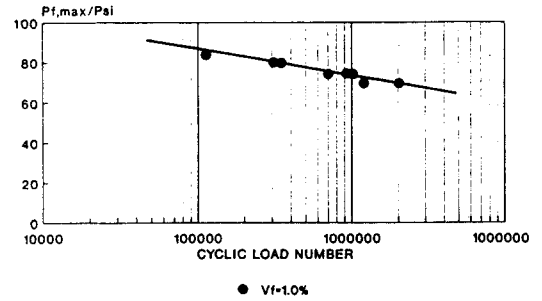


Fig.6 The S-N curve of SFRC beam.

4. 결론

본 논문에서 실험한 일련의 강섬유보강콘크리트의 피로 거동은 다음과 같다.

반복회수가 증가함에 따라 동일하중 상태하의 중앙처짐은 증가하였으며, 시험체는 중앙처짐이 최종적으로 어느 한계값에 근접한 직후 파괴파괴되었다. 이때 강섬유 혼입량이 클수록 완만히 파괴가 이루어졌으며 이로써 강섬유 혼입량이 증가할수록 연성이 높아짐을 알 수 있었다. 또한 반복회수에 대한 강섬유보강콘크리트의 비탄성변형 에너지와 탄성변형에너지의 비교 분석 결과에서, 강섬유 혼입량이 클수록 영구변형에 손실되는 에너지가 크게 감소하고, 균열확대에 소모되는 에너지가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 피로하중하에서 콘크리트의 균열성장이 강섬유에 의해 효과적으로 개선될 수 있음을 의미한다.

한편 본 피로실험 결과를 회귀분석하여 구한 S-N선도에 의하면 강섬유 혼입량이 1.0%인 강섬유보강콘크리트의 반복회수 200만회에 대한 피로강도는 초기균열 발생시의 정적강도의 약 70%임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 1990년도 박사과정 학위논문

연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

기호

C : 실험상수

K : 실험상수

N : 피로수명

R : 피로강도

$Y = \log K$

$\alpha = \log R$

$\beta = C \cdot \log e$

참 고 문 헌

1. Norby, G. M., "Fatigue of Concrete--A Review of Research," Journal of ACI, Proceedings Vol.57, No.8, 1958, pp.174~219.

2. Batson, G.B., Ball, C., Bailey, L., Landers, E., and Hook, J., "Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," Journal of ACI, Proceedings Vol.69, No.11, 1972, pp.673~677.

3. Glücklich, Goseph, "On The Compression Failure of Plain Concrete," T & A.M. Report No.215, University of Illinois, Urbana, Mar.1962.

4. Shah, S.P. and Winter, G., "Inelastic Behavior and Fracture of Concrete," Journal of ACI, Proceedings Vol.63, No.9, 1966, pp.925~930.

5. Romualdi, J.P. and Batson, G.B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement," Journal of ACI, Proceedings Vol. 60, No.6, 1963, pp.775~790.

6. Romualdi, J.P. and Batson, G.B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," ASCE, EM3, 1963, pp. 147~168.

(접수일자 : 1991. 11. 5)