

피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 인장변형에 관한 연구

Tensile Strain of Steel Fiber Reinforced Concrete under Fatigue Load

張東一*, 蔡元奎**, ○朴哲佑***, 琨仁基***
Dong-Il Chang, Won-Kyu Chai Cheol-Woo Park In-Ki Min

ABSTRACT

In this thesis, the fatigue tests were performed on a series of SFRC (steel fiber reinforced concrete) to investigate the flexural tensile behavior of SFRC varying with the steel fiber contents and the steel fiber aspect ratios. Beam specimens of 10x10x60cm are used. The specimen series are classified according to the steel fiber contents varying 0.5, 1.0, 1.5%, and to the steel fiber aspect ratios varying 60, 80, 100.

The three point loading system was used in the fatigue tests. The minimum value of repeated loading was fixed at 10.0 kgf and the maximum value was 75% to static ultimate strength for each specimens, respectively. During the test, the flexural strain is measured periodically using concrete strain gages located at the lower end of the mid-span, and the stress-strain curves were drawn for each specimens, respectively.

From the tests result, it was found that the larger steel fiber content and the smaller the steel fiber aspect ratio is, the tensile strain of SFRC under fatigue load proportionally increases. By the regression analysis on these results, the empirical formulae to predict the tensile strain of SFRC were suggested. In comparison of the tensile elastic modulus under fatigue load, it was also found that the larger steel fiber content and the smaller steel fiber aspect ratio is, the smaller decreasing rate of the stiffness of SFRC under fatigue load decreased.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

콘크리트나 모르타에 대한 피로파괴 현상은 크게 다음과 같은 세가지 단계로 진행된다. 1) 최초의 단계는 결함 또는 균열이 시작되는 단계이며, 그 다음은 한계크기에 대한 결함 또는 균열의 느린 성장 단계로서 콘크리트와 같은 이질적인 재료 안에서 일어나는 복합적인 성질을 말한다.

다. 2), 3) 이 이후에는 이러한 결함 또는 균열이 급하게 성장하게 되며, 이를 세번째 단계인 한계크기에 대한 결함 또는 균열의 빠른 성장 단계라고 한다.

실제적으로 콘크리트의 피로파괴의 단계중 균열의 시작 단계인 첫번째와 균열의 빠른 성장 단계인 세번째의 단계를 조절할 수 있는 방법은 거의 없다. 그러나 콘크리트나 모르타에 불규칙적으로 분산된 강섬유를 보강하는 것으로 두번째 파괴 단계인 결함 또는 균열의 느린 성장 단계를 좀 더 늦추거나 억제할 수 있는 가능성은 있다. Romualdi와 Batson^{4), 5)}은 모르타에 강섬유를 보강함으로써 결함

* 정회원 한양대 토목공학과 교수
** 정회원 한양대 토목공학과 강사
*** 정회원 한양대 토목공학과 석사 과정

과 균열의 성장을 늦출 수 있고 정적 휨 강도가 증진된다고 하였으며, 이로써 반복하중을 받는 콘크리트에서 결함의 성장이 강섬유를 사용함으로써 감소될 수 있다는 것과 강섬유에 의해 더 큰 피로강도를 나타낼 수 있다는 것이 확실하다.

지금까지의 여러 연구자들의 연구 결과에 의하면 강섬유보강콘크리트의 강도 증대 효과는 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비가 주요 원인임을 알 수 있다. 그러나 아직 이들 변수들이 강섬유보강콘크리트의 휨 인장거동에 미치는 영향이 체계적으로 정립되어 있지 않은 실정이며, 특히 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 휨 인장거동에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 논문에서는 강섬유 혼입량, 강섬유 형상비의 변화에 대한 강섬유보강콘크리트의 휨 인장거동을 고찰하고, 이들 변수들과 강섬유보강콘크리트의 인장변형율과의 관계를 규명하기 위하여 일련의 강섬유보강콘크리트 시험체에 대하여 피로실험을 수행하였다.

1.2 연구방법

피로실험시 최소하중은 10 kgf 으로 일정하게 하였고, 최대하중은 시험체가 안정된 피로하중을 받도록 하기 위하여 정적극한하중의 75%로 하였다. 하중재하 회수가 증가함에 따라 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 하중변화에 대한 휨 인장변형율을 측정하였으며, 반복회수에 대한 응력-변형율 선도를 작성하였다.

이들 결과를 토대로 강섬유 혼입량, 강섬유 형상비의 변화에 따른 강섬유보강콘크리트의 응력-변형율 선도를 비교 분석하여 피로하중하의 강섬유보강콘크리트의 강도 변화를 고찰하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 실험에서는 직경이 0.6mm, 길이가 36mm(형상비 60), 48mm(형상비 80),

60mm(형상비 100)인 원형 강섬유를 사용하였으며 강섬유의 화학적 성분과 물리적 성질은 각각 표 2-1, 표 2-2와 같다.

표 2-1. 강섬유의 화학적 성분.

종 류	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
HSWR37	0.34 ~0.41	0.15 ~0.35	0.30 ~0.60	0.0040 이하	0.040 이하

표 2-2. 강섬유의 물리적 성질.

밀도 (g·cm ⁻³)	탄성계수 (kgf·cm ⁻²)	인장강도 (kgf·cm ⁻²)
7.85	2.00×10 ⁶ ~2.04×10 ⁶	2110~2400

콘크리트 배합시 시멘트는 현재 현장에서 주로 사용되고 있는 S사 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 골재는 비중이 각각 2.65, 2.60인 강자갈, 강모래를 사용하였으며 최대치수를 19mm로 하였다. 콘크리트의 배합설계표는 표 2-3과 같다.

표 2-3. 콘크리트의 배합설계표.

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트 트 비 (%)	잔골재율 (%)
19	10	2.0	38.4	45

잔골재율 (%)	단위량(kgf·m ⁻³)			
	물	시멘트	잔골재	굵은골재
45	185	482	752	936

2.2 시험체

시험체 제작시 섬유의 배향은 무작위 배향을 이루게 하였으며 섬유몽침현상이 생기지 않도록 최대의 배려를 하였다. 또한 강섬유보강콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 공극이 발생되기 쉬우므로 다

검시 진동기를 사용하였고 수중양생을 실시하였다. 보 시험체는 10×10×60cm로 일정하게 모두 7개를 제작하였으며, 시험체의 종류는 표 2-4와 같이 구분하였다.

표 2-4. 시험체의 종류.

강섬유 혼입량 (%)	강섬유형상비 (L/D)	초기균열비 (a ₀ /d)
0.5	80	0.0
1.0	80	0.0
1.5	80	0.0
1.0	60	0.0
1.0	100	0.0
1.0	80	0.2
1.0	80	0.4

2.3 실험방법 및 측정

피로실험의 재하는 25ton 용량의 피로 시험기를 사용하였으며, 단진재하로 하였다. 재하시 반복회수 10회까지는 정적으로 재하하였으며, 그 이후 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하면서 10Hz의 속도로 재하하였다. 그리고 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 인장 변형율을 측정하였다. 피로실험의 개략도는 그림 2-1과 같다.

3. 실험 및 고찰

본 연구에서는 강섬유보강콘크리트의 휨 인장거동을 알아보기 위하여 피로실험을 수행하였으며, 이들 결과는 표 3-1과 같다.

표 3-1. 피로시험 결과.

V _f (%)	L/D	a ₀ /d	P _{f, max} (kgf)	N _u (회)
0.5	80	0.0	675	544,040
1.0	80	0.0	650	998,390
1.5	80	0.0	700	749,110
1.0	60	0.0	650	706,620
1.0	100	0.0	600	200만 이상
1.0	80	0.2	450	978,650
1.0	80	0.4	275	312,000

ε _{max, 1}	E ₁ (kgf/cm ²)
0.180×10 ⁻³	0.375×10 ⁶
0.188×10 ⁻³	0.391×10 ⁶
0.157×10 ⁻³	0.409×10 ⁶
0.201×10 ⁻³	0.417×10 ⁶
0.184×10 ⁻³	0.349×10 ⁶
0.169×10 ⁻³	0.451×10 ⁶
0.249×10 ⁻³	0.508×10 ⁶

여기서, V_f는 강섬유 혼입량, L/D는 강섬유형상비, a₀/d는 초기균열비, P_{f, max}은 최대 반복하중, N_u는 피로파괴시 반복회수, ε_{max, 1}은 반복회수 1회 일때의 최대 인장 변형율, E₁은 반복회수 1회일때의 탄성계수이다.

3.1 반복회수와 최대 인장변형율의 관계

피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 응력-변형율 선도의 결과에서 강섬유보강콘크리트의 최대 인장변형율을 강섬유 혼입량 및 강섬유형상비의 변화에 대해 나타내면 각각 그림 3-1, 그림 3-2와 같다.

그림 3-1, 그림 3-2에서 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 최대 인장변형율은 강섬유 혼입량이 클수록 그리고 강섬유형상비가 작을수록 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서는 이들 결과를 회귀분석하여 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 최대 인장변형율을 반복회수와 강섬유 혼입량 및 강섬유형상비의 관계로 다음과 같이 나타내었다.

$$\bigcirc \epsilon_{\max} = 0.1221 \times 10^{-3} \times V_f + 0.2655 \times 10^{-8} \times N + 0.1572 \times 10^{-3}$$

$$\bigcirc \epsilon_{\max} = -0.2088 \times 10^{-5} \times L/D + 0.1925 \times 10^{-8} \times N + 0.4115 \times 10^{-3}$$

여기서 ε_{max}은 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 최대 인장변형율, V_f는 강섬유 혼입량, L/D는 강섬유형상비, N은 반복회수이다.

이들 관계식에서 반복회수가 증가함에 따라 증가되는 강섬유보강콘크리트의 최

대 인장변형율은 강섬유 형상비보다는 강섬유 혼입량의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다.

3.2 반복회수와 탄성계수의 관계

본 연구에서는 응력-변형률 선도의 기울기를 이용하여 강섬유보강콘크리트의 탄성계수를 측정하였으며, 이들 결과를 토대로 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비의 영향을 비교, 분석하였다. 정적하중 재하시 강섬유보강콘크리트의 탄성계수를 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비의 변화에 대해 정리하면 각각 그림 3-3, 그림 3-4와 같다.

그림 3-3, 그림 3-4에서 알 수 있듯이 정적하중 재하시 강섬유보강콘크리트의 탄성계수는 강섬유 혼입량이 증가할수록 그리고 강섬유 형상비가 감소할수록 선형에 가깝게 증가하였다. 또한 이는 초기균열비에도 영향을 받았으며, 초기균열비가 증가함에 따라 증가하는 양상을 나타내었다. 본 연구에서는 이들 결과를 이용하여 정적하중 재하시 강섬유보강콘크리트의 탄성계수를 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비를 변수로 회귀분석에 의하여 다음과 같은 특성식을 도출하였다.

i) 정적하중 재하시 탄성계수와 강섬유 혼입량의 관계.

$$E_{st} = 0.340 \times 10^5 \times V_f + 0.358 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

ii) 정적하중 재하시 탄성계수와 강섬유 형상비의 관계.

$$E_{st} = -0.170 \times 10^4 \times L/D + 0.522 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

여기서, E_{st} 는 정적하중재하시의 강섬유보강콘크리트의 탄성계수, V_f 는 강섬유 혼입량, L/D 는 강섬유 형상비이다.

이들 결과에서 정적하중재하시 강섬유보강콘크리트의 탄성계수는 강섬유 혼입

량 뿐만 아니라, 강섬유 형상비의 변화에 대해서도 변화함을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서는 반복하중을 받는 강섬유보강콘크리트에 대하여 반복회수가 증가함에 따른 강섬유보강콘크리트의 탄성계수의 변화양상을 고찰하였으며, 이들 결과에서 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 탄성계수는 반복회수가 증가함에 따라 감소하는 양상을 갖고 있음을 알 수 있었다. 이들 결과를 각각 그림 3-5, 그림 3-6에 나타내었다.

그림 3-5, 그림 3-6에서 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 반복회수 증가에 따른 탄성계수의 감소량은 강섬유 혼입량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 강섬유 혼입량이 1.5%일때 급격히 감소하였다. 즉 이 결과에서 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 강성은 정적하중 재하시에는 강섬유 혼입량에 비례하여 강섬유 혼입량이 클수록 증가하며, 반복회수가 증가함에 따라 강성의 감소되는 비율이 강섬유 혼입량이 1.5%일때 매우 작음을 알 수 있다. 한편 반복회수 증가에 따른 강섬유보강콘크리트의 탄성계수의 감소량은 강섬유 형상비가 증가할수록 선형에 가깝게 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 일련의 강섬유보강콘크리트 시험체에 피로실험을 수행하여 강섬유보강콘크리트의 휨 인장거동을 고찰하였다. 본 논문에서 연구한 피로하중을 받는 강섬유보강콘크리트의 휨 인장거동은 다음과 같다.

강섬유보강콘크리트의 최대 인장변형율은 반복회수가 증가함에 따라 선형에 가깝게 증가하였으며, 강섬유 혼입량이 클수록 그리고 강섬유 형상비가 작을수록 큰 폭으로 증가하였다. 본 연구에서는 반복회수와 강섬유 혼입량 그리고 반복회수

와 강섬유 형상비의 변화에 따른 강섬유 보강콘크리트의 최대 인장변형을 특성식을 도출하였다.

한편 응력-변형을 선도의 기울기를 이용하여 측정한 탄성계수의 비교 결과에서 피로하중하의 강섬유보강콘크리트의 강성은 정적하중재하시에는 강섬유 혼입량이 클수록 또 강섬유 형상비가 작을수록 증가하며, 반복회수가 증가함에 따라 강성의 감소비율이 강섬유 혼입량이 클수록 또 강섬유 형상비가 작을수록 작아짐을 알 수 있었다.

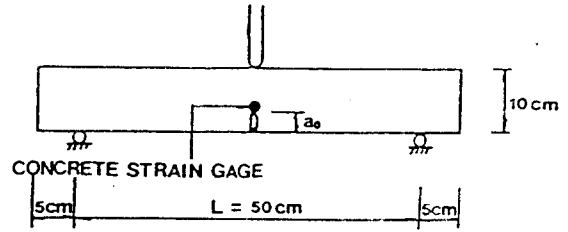


그림 2-1. 피로실험의 개략도.

참고문헌

1. Barr, B., Liu, K., and Dowers, R. C., "A Toughness Index to Measure the Energy Absorption of Fibre Reinforced Concrete, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 4, 1982, pp. 221-227.
2. Glucklich, Goseph, "On The Compression Failure of Plain Concrete," T & A.M. Report No. 215, University of Illinois, Urbana, Mar.1962.
3. Shah, S.P. and Winter, G, "Inelastic Behavior and Fracture of Concrete," Journal of ACI, Proceedings Vol. 63, No. 9, 1966, pp.925-930
4. 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.
5. Romualdi, J.P. and Batson, G.B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," ASCE, EM3, 1963, pp.147-168.

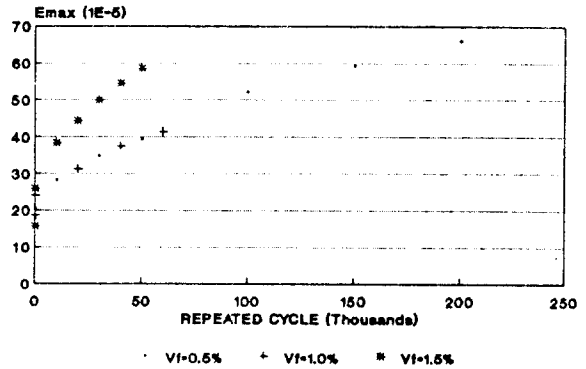


그림 3-1. 강섬유 혼입량의 변화에 대한 반복하중과 최대 인장변형율의 관계.

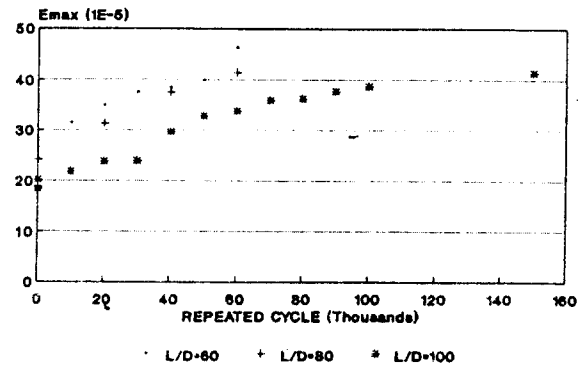


그림 3-2. 강섬유 형상비의 변화에 대한 반복하중과 최대 인장변형율의 관계

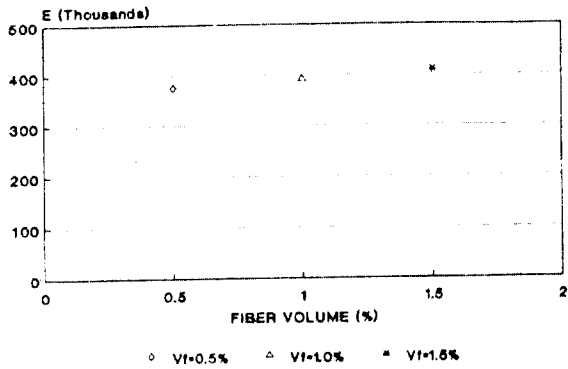


그림 3-3. 정적하중 재하시 탄성계수와 강섬유 혼입량의 관계.

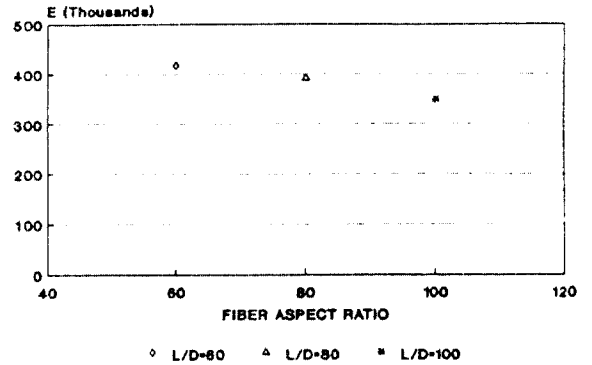


그림 3-4. 정적하중 재하시 탄성계수와 강섬유 형상비의 관계.

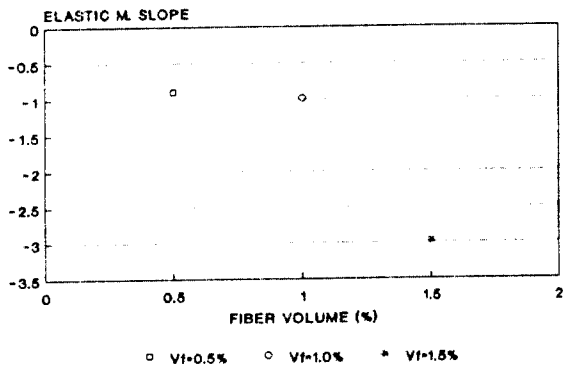


그림 3-5. 강섬유 혼입량에 대한 반복회수와 탄성계수 변화비율의 관계.

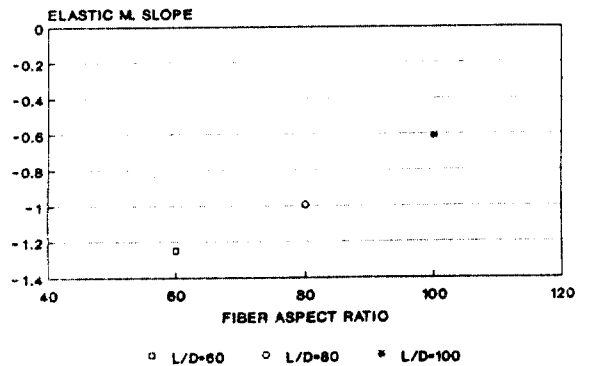


그림 3-6. 강섬유 형상비에 대한 반복회수와 탄성계수 변화비율의 관계.