

노치를 가진 강섬유 보강 고강도콘크리트 보의 휨 피로거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Flexural Fatigue Behavior
of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Beams with Single Edged Notch

구 봉 근* ○ 김 태 봉** 김 홍 통***
Koo, Bong-Kuen Kim, Tae-Bong Kim, Hong-Yong

ABSTRACT

The fatigue tests were performed on the high strength concrete beams with single edged notch which was reinforced steel fiber. The steel fibers were used 1.0 percent by volume fraction. These were tested consists of constant amplitude tests for different levels of loading. The test program included endurance limit with respect to flexural fatigue and relation of load-CMOD(crack mouth opening displacement). The results of test, it is found from S-N curve that the fatigue strength for a life of 2 million cycles of load was approximately 70 percent with respect to the static ultimate strength.

1. 서 론

최근, 고층건물 및 거대한 해양구조물, 원자력발전소 등의 출현으로 고강도 콘크리트의 사용범위는 보다 더 다양해지고 있으나, 콘크리트는 본래 취성재료이며, 고강도화 될수록 이러한 현상은 더욱 두드러진다. 이러한 콘크리트 성질을 개선할 목적으로 강섬유를 불규칙한 배열로 모르타나 콘크리트 속에 분산시킴으로써 인성, 균열구속성, 균열분산성 및 내충격성을 개선시킨 복합재료로서의 이용이 활발해지고 있다. 또한, 열차나 자동차 등의 운행하중을 받는 교량, 콘크리트 도로포장 및 철도의 콘크리트 침목 등의 설계에 있어서 콘크리트의 피로 파괴에 대한 연구가 주목되게 되었다. 그 이유는 콘크리트 부재에 있어서 극한강도설계법의 채택과 높은 응력을 받는 고강도 재료의 사용이 늘고 있기 때문이다.¹⁾ 더욱이 이런 구조부재에는 사용성한계상태로서 균열이 문제가

되는 일이 많고, 활하중에 의해 비교적 큰 인장응력이 발생한다. 이런 부재의 피로거동은 설계상 반드시 검토하여야만 한다.

따라서, 본 연구에서는 고성능 감수제를 사용한 고강도 콘크리트에 강섬유를 보강한 재료를 대상으로 휨 피로 실험을 실시하여 강섬유보강 고강도콘크리트의 피로파괴거동을 규명함으로써 장차 내진구조물이나 충격저항, 반복하중 등을 받는 구조물 등에 효과적으로 이용하기 위함이다.

2. 콘크리트의 피로파괴

정적하중과 동적하중, 피로하중과 충격하중을 구별하면, 정적하중과 지속하중은 시간에 따라서 일정한 하중이며, 동적하중은 시간에 따라서 불규칙하게 변하는 하중이고, 피로와 충격하중은 동적하중의 특별한 경우이다. 피로하중은 반복횟수 100번 이상에서 피로파괴를 일으킬 수 있는 하중반복의 연속을 나타낸다. 그러나, 지진하중이나 충격하중은 100번 이하의 반복횟수에서도 파괴를 일으킬 수 있는 매우 높은 수준의 반복하중을 받기 때문에 저 사

* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공박
** 정희원, 충북대학교 토목공학과 강사, 공박
*** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

이클 피로(low cycle fatigue)라고 구분된다.²⁾

콘크리트의 피로파괴는 주어진 반복횟수에 대해서 저항할 수 있는 정적강도의 백분율(응력수준)으로써 나타내진다. 피로파괴에 있어서 응력수준의 효과는 보통 S-N곡선이라 불리우는 응력-피로수명곡선으로 나타내어진다. 여기서, 종축은 응력수준, 횡축은파괴에 이르기까지의 반복횟수를 대수 눈금으로 나타낸다. 피로강도는 응력의 수준이나, 응력비, 재료특성 및 환경조건에 따라서 영향을 받는다. 콘크리트의 피로파괴의 특징은 정적 하중하에서의 파괴와 비교해서 상당히 큰 변형을 일으키는 것과 미세균열의 발생을 일으키는 점이 금속재료의 피로파괴와 다른 점이다.²⁾ 무근콘크리트에서 피로파괴의 응력수준은 압축, 인장, 휨에 대해서 정적강도의 대략 55%로 잡고 있다.¹⁾

또한, 구조부재로서의 콘크리트는 불규칙한 변동하중을 받지만, 콘크리트의 피로거동에 있어서는 불규칙 하중의 효과를 나타낼 수 있는 자료가 충분하지 못하기 때문에, 대부분의 실험실에서는 일정한 최대하중과 최소하중 사이를 반복하는 형태로 이상화시켜 실험을 실시하고 있다.

본 실험의 목적 중의 하나는 휨 피로하중하에서 강섬유 보강 콘크리트의 내구한도(피로한도)를 결정하기 위한 것이다. 본 실험에서의 내구한도는 반복횟수 200만회까지 견딜 수 있는 최대하중으로 정의한다. 이 200만회 한계는 교량의 상판이나 고속도로 포장과 같이 반복하중을 받는 구조물의 피로수명의 대략치로써 일반적인 교량 구조물의 피로수명으로 선택된다.

3. 실험개요

3.1 사용재료 및 배합

Table 1. Mixing proportion

Fiber content V_f (vol%)	Aggre. max size (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Proportion by unit weight (kg/m ³)					
						Water	Cement	Fine aggre.	Coarce aggre.	Admix.	Steel fiber
1.0	15	8	30	55	3	181	603	830	703	7.2	78.5

사용한 시멘트는 국내 H사 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 잔골재로서 비중이 2.57이고, 조립률이 2.53인 강모래와 굵은골재로서 최대치수가 15mm이고, 비중이 2.68이며, 조립률이 6.50인 쇄석을 사용하였다.

한편, 강섬유는 모양이 양단 hook형으로 개개의 강섬유가 수용성 아교로 다발의 형태로 붙어 있는 벨기에의 BEKART사 Dramix제품으로 비중은 7.85이고 길이가 30mm이며 형상비(aspect ratio)가 60이었다.

본 실험에서는 고강도 강섬유 보강 콘크리트를 목표로 물-시멘트비를 30%로 낮추고, 이를 위해 고강도용 고성능 혼화제(LIGASE G)를 사용하였다.

또한, 배합기준은 일정한 반죽질기(consistency)를 유지하기 위해 小林一輔 등³⁾의 문헌을 참조하여 결정하였다. 각 섬유길이와 혼입률에 대한 배합설계표는 Table 1과 같다.

3.2 공시체

시험편의 치수는 10×10×40cm이고, 강섬유의 혼입률은 1%로 일정하게 하였고, 시험편은 정적 휨강도용 공시체 6개와 휨 피로실험용 20개를 제작하였으며, 압축강도와 할열인장강도용 공시체 모두 30개를 $\phi 10 \times 20$ 실린더 몰드를 이용하여 휨공시체 타설시 동시에 제작하였다.

콘크리트의 혼합을 위하여 용량 50l의 강제식 믹서를 사용하였고, 혼합순서는 먼저 보통 콘크리트의 순서로 혼합한 뒤 강섬유를 투입 혼합하였다.

믹서 혼합이 끝난 콘크리트는 삽으로 다시 손비빔 한 후 거푸집에 타설하였으며, 이때 시험편의 측면을 위로 하여 2층으로 나누어 최대 휨모멘트가 일어나는 중앙부를 먼저 타설하였고, 각 층마다 콘크리트의 표면이 평탄하게 될

때까지 붕 진동기를 사용하여 거푸집 측면을 진동시켜 다짐을 실시하였다.

타설된 공시체는 온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 이고, 습도 60% 이상인 곳에서 24시간 이상 양생 한 후 탈형하였으며, 탈형된 공시체는 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 인 수중에서 양생기간에 따른 강도의 차이를 없애기 위하여 60일 이상 수중 양생한 후 공기중 양생하였다.

보의 중앙에 노치를 일정하게 주기 위하여 다이아몬드 saw cutter를 이용하여 시험편 높이의 0.3배로 시험 하루전 노치를 만들었다.

3.3 실험 방법

정적 휨 강도 실험에 사용한 시험기는 일본 Shimadzu사의 UHF형 5 ton Load Cell이 부착된 Servopulser를 이용하여 지간 30cm의 중앙점 재하방법으로 실험하였다. 실험시의 재하속도는 $0.3\text{mm}/\text{min}$ 의 Stroke제어로 실험을 실시하였다. 한편, 시험편 노치부의 균열개구변위(CMOD)를 측정하기 위하여 미리 제작한 노치부의 강제 Knife Edge에 3mm 클립 게이지(clip gage)를 끼우고, Yaman사의 Analysing Recorder의 GBIP를 이용하여 CMOD를 하중과 함께 Personal Computer에 저장한 후 분석하였다.

또한, 피로실험에도 정적 휨 강도 실험에 사용된 Servopulser를 이용하였고, 클립 게이지도 같은 방법으로 부착하였다. 휨 피로파괴 특성을 규명하기 위하여 정적 휨강도에서 최대 하중 평균치의 백분율로써 60%, 70%, 80%, 90%수준으로 피로실험을 실시하였다. 피로실험의 재하속도는 초기 1회부터 5회까지는 정적 재하속도로 하고, 그 이후는 20Hz로 하였다. Neville⁴⁾은 극히 빠른 재하속도를 제외하고 피로강도는 거의 하중속도에 거의 영향이 없다고 보고하고 있다.

반복파형은 시간에 대하여 정현(sine)파로 하였으며, 응력비($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)는 0.1로, 즉 최소하중은 최대하중의 10%로 하는 것을 표준으로 하였으나, 시험 도중 약간의 변화는 있었다.

여기서, 보의 완전 분리파단까지의 실험은

안전상 문제가 되므로 CMOD변위가 대략 0.5mm를 초과하면 파단된 것으로 간주하였다. 이것은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 동일한 시험편의 정적 실험에서 얻어진 하중-CMOD곡선으로부터 0.5mm의 CMOD변위가 최대하중을 지나서 부재가 파단되었다고 판단되기 때문이다.

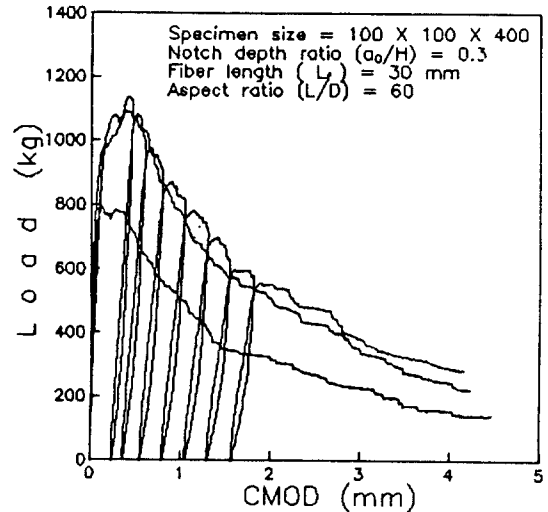


Fig. 1 Typical load-CMOD curve for static test

반복재하횟수(N)는 200만회를 상한으로 하고, 200만회에도 파단되지 않으면 정적 파괴 실험을 행하였으며, 일부는 응력수준($S = \sigma_{\max}/\sigma_b$)을 한 단계씩 높여 가면서 재시험하였다.

또한 균열 진전 길이를 확인하기 위하여 각 반복횟수마다 표면을 아세톤 등의 용액으로 깨끗이 한 후 눈으로 조사하였으나, 이러한 표면 조사는 내부 균열과 외부 균열의 차가 크게 나타나거나, 강섬유의 변형을 경화 등의 요인으로 가치있는 데이터의 확보는 어려운 것으로 판단되었다.

또한, 각 반복횟수마다 콤플라이언스의 변화를 조사하기 위하여 반복횟수(N)가 100, 1천, 1만, 10만, 100만, 200만에 도달할 때에도 시험기를 정지하고 정적재하실험을 행하였다.

4. 실험 결과

4.1 정적강도실험 결과

피로실험용 공시체의 제작시 동시에 만들어졌던 압축강도용 공시체와 활열인장강도용 공시체를 시험한 결과 압축강도는 평균 724 kg/cm²이었으며, 탄성계수는 3.23×10⁵ kg/cm²이었고, 활열인장강도는 71.4 kg/cm²이었다.

또한, 노치가 없는 휨강도 시험편의 정적 휨강도 시험결과는 평균 94.2 kg/cm²이었고, 초

기균열강도는 72.1 kg/cm²이었다.

한편, 피로실험에 사용한 노치를 가진 휨공시체의 정적휨강도 시험결과 Fig. 1에서 보는 바와 같이 최대하중이 평균 1,007 kg으로 나타났으며, 이를 피로실험에서 반복하중 수준의 기준으로 사용하였다.

4.2 휨 피로실험결과

피로실험의 결과를 Table 2에 나타냈다.

Table 2 Test results of flexural fatigue test

Beam No.	Fatigue load (kg)			Number of cycle to failure, <i>N</i>	Percentage of static maximum load, %	Static max. load after fatigue, kg	Comment(a)
	Min.	Max.	ratio				
FA-1				1		1,090 (b)	Static(c)
FA-2	74	814	0.09	200,000	80.0	1,010(1.00)	
FA-3	80	806	0.10	20,000	80.0	1,150	
FA-4	107	806	0.13	2,000,000	80.0	1,583(1.57)	
FA-5	0	806	0	10	80.0	964	Static(c)
FA-6	80	806	0.10	6,200	80.0	1,030	
FA-7	80	806	0.10	50,000	80.0	1,367(1.36)	
FA-8	90	810	0.11	900,000	80.4	1,365(1.36)	
FA-9	70	608	0.12	2,000,000	60.4	1,290(1.28)	
FA-10	55	606	0.09	2,000,000	60.2	1,355(1.35)	
FA-11	57	611	0.09	2,000,000	60.7		Continued(d)
	102	704	0.14	2,000,000	69.9		Continued(e)
	119	807	0.15	817,360	80.1		Failed(f, g)
FA-12	90	706	0.13	2,000,000	70.1	1,350(1.34)	
FA-13	68	707	0.10	160,480	70.2	972(0.97)	
FA-14	62	712	0.09	2,000,000	70.7		Continued(d)
	74	808	0.09	2,000,000	80.2		Continued(e)
	81	908	0.09	1,110,000	90.2	1,311(1.30)	Continued(f)
FA-15	137	904	0.15	58,310	89.8	1,155(1.15)	
FA-16	91	906	0.10	1,370	90.0	1,057	
FA-17	91	906	0.10	2,500	90.0	1,118	
FA-18	71	814	0.09	24,400	80.8	842	
FA-19	71	705	0.10	2,400	70.0		Failed(g)

Note : (a) The result of static test was average 1,007 kg.

(b) () is ratio for static maximum load.

(c) This specimen was failed during the static cycle load.

(d) This specimen was tested at a higher stress when it did not failed at 2,000,000 cycle.

(e) This specimen was retested for a second time with higher load.

(f) This specimen was retested for a third time with higher load.

(g) This specimen was failed during the fatigue cycle load.

Table 2로부터 피로특성을 규명하기 위하여 Fig. 2와 같이 S-N곡선을 그려 나타냈다.

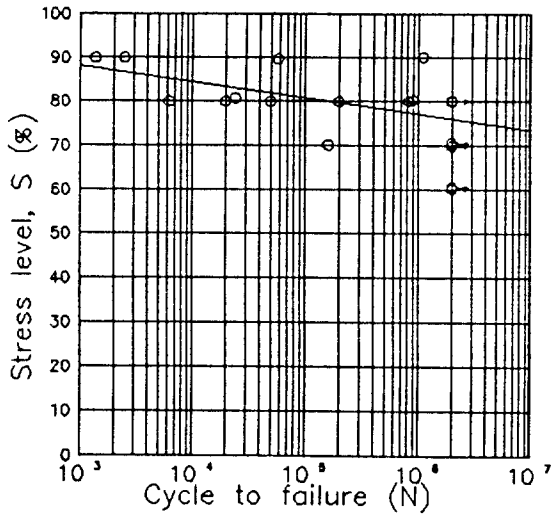


Fig. 2 S-N curve for steel fiber concrete using 1.0% by volume

Fig. 2에 의하면 응력수준이 80% 이상되는 영역에서는 피로수명의 분포가 크게 나타나고, Murdock와 Kesler⁵⁾ 및 Tepher⁶⁾가 지적한 바와 같은 명료한 선형관계를 나타내고 있지는 않고 있다. 그러나, 응력수준이 80%보다 작은 영역에서는 반복횟수 200만에도 파괴되지 않는 경우가 대부분이었다. 따라서, 강섬유 보강 콘크리트의 정적 휨 파괴강도에 대한 휨 피로 파괴수명은 70%이상 된다고 판단된다.

보통 콘크리트의 휨 피로강도가 약 55%임을 생각할 때 강섬유의 보강은 콘크리트의 피로강도를 상당히 증진시키고 있음을 알 수 있고, 이를 이용하여 반복하중을 받는 구조물 등에 유효하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 3은 피로하중의 응력범위, 즉 최대하중과 최소하중의 차에 대한 피로수명의 관계를 나타내고 있다. 콘크리트의 S-N곡선은 보통 정적 최대응력에 대한 피로하중의 비로 나타내지만, 강섬유 보강 콘크리트의 S-N곡선은 강재의 경우와 같이 응력의 차에 대한 피로수명의 관계로 평가를 하는 것이 그림에서와 같이 더 명료한 관계를 얻을 수 있다고 생각된다.

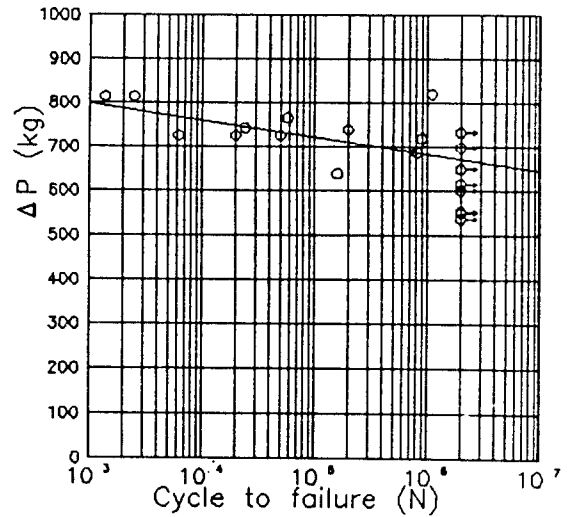


Fig. 3 S-N curve for ΔP and number of cycle

한편, Table 2에서 나타난 바와 같이 피로실험 후 정적 파괴하중의 값이 피로실험을 하지 않은 정적실험에서 구한 최대하중에 비하여 평균 1.27배 증가하였고, 최대 57%까지 증가하였다. 이러한 현상은 문헌^{1,2)}에서도 찾아 볼 수 있었으며, 이는 강섬유로 인한 변형경화현상인 것으로 사료된다.

Fig. 4는 정적실험에서 얻은 하중-CMOD곡선

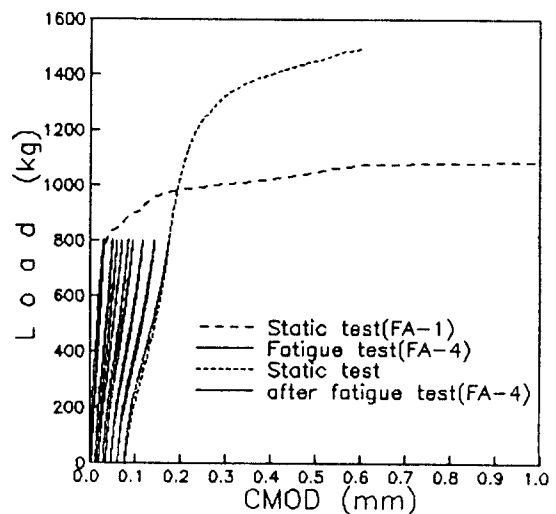


Fig. 4 Typical load-CMOD curve between static and fatigue tests

과 피로실험에서 반복횟수에 따른 하중-CMOD곡선의 각 반복횟수마다 기울기의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 200만 횟수의 피로실험 후 정적 휨강도 실험에서 얻은 강도는 반복하중을 받지 않은 시험편에 비하여 더 큰 강도와 변형을 나타내고 있다.

Romualdi⁷⁾도 이러한 현상을 관찰하고, 양생기간 동안의 콘크리트의 건조수축과 반복하중의 작용에 의해서 건조수축때문에 생긴 잔류인장응력의 완화현상 때문으로 설명하고 있다.

지금까지 보고된 대부분의 강섬유 보강 콘크리트의 피로강도는 초기균열강도를 기준으로 하고 있기 때문에 값에 변화가 많고, 다소 과소 평가되고 있다고 보고되어 있다.⁸⁾ 강섬유 보강 콘크리트의 초기균열점을 일정하게 찾는다는 것은 어려우므로 균열점에 대한 평가는 일관성이 없다고 본다. 따라서 실제 강섬유 보강 콘크리트의 피로강도는 지금까지 보고된 것보다도 더 큰 것으로 생각할 수 있다.

6. 결 론

고강도 콘크리트에 강섬유를 보강한 강섬유 보강 고강도콘크리트의 휨 피로거동에 대한 실험적 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

강섬유 보강 고강도콘크리트의 피로수명을 예측하기 위하여 피로시험을 수행한 결과 응력수준이 80% 이상에서는 큰 분산을 보이고 있으나, 정적 휨 파괴강도에 대한 피로수명에서의 피로파괴 강도비는 70%이상 된다고 판단된다. 따라서 보통 콘크리트의 휨 피로강도비 55%보다 피로강도를 상당히 증진시킬 수 있음을 알 수 있었다.

한편, 피로하중을 받는 강섬유 보강 콘크리트는 피로후 정적 파괴강도가 피로를 받지 않은 정적 파괴강도보다 평균 27% 증가하였다. 이는 강섬유의 변형경화현상 때문으로 생각한다.

이상의 결과를 살펴보면 최근 그 사용성이 점차 요구되고 있는 고강도 콘크리트의 최대 문제점인 취성을 강섬유로 보강함으로써 강섬유 보강 콘크리트가 일반 고강도콘크리트보다

피로수명에 있어서 정적 휨 파괴강도에 대한 피로강도비가 훨씬 크며, 강섬유 보강 콘크리트의 경우 피로실험 후 정적 파괴강도가 오히려 크게 됨을 고려 할 때 많은 반복하중을 받는 구조물 등에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 215, "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", *ACI Journal*, ACI 215R-74, Vol.71, No.3, 1974, pp.97~121.
2. Shah, S.P., and Chandra, S. "Fracture of Concrete Subjected Cycle Loading", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.67, No.10, 1970, pp. 816~824.
3. 小林一輔, 岡村雄樹, "所要のコンシステンシーを得るための鋼纖維補強コンクリートの配合設計方法", *日本土木學會論文報告集*, 第293號, 1980.4, pp.111~119.
4. Neville, A.M., "*Hardened Concrete : Physical and Mechanical Aspects*", ACI, Detroit, Michigan and Iowa State Univ. Press, Iowa, 1971.
5. Murdork, J.W., and Kesler, C.E., "Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.55, No.2, Aug. 1958, pp.221~232.
6. Tepfers, R., "Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.76, No.8, 1979, pp.919~933.
7. Romualdi, J.P., "The Static Cracking Stress and Fatigue Strength of Concrete Reinforced with Short Pieces of Thin Steel Wire", *Cement and Concrete Association*, London, 1968, pp.190~201.
8. Anderson, W.E., "Proposed Testing of Steel-Fibre Concrete to Minimize Unexpected Service Failures", *Proceedings, RILEM Symposium*(Sheffield, 1978), pp.223~232.