

# 고강도 철근콘크리트 보의 피로거동에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Fatigue Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beams

임 채 영(원광대) · 박 종 건\*(금강농조) · kwak 계 환(원광대)  
Lim, Chae Young · Park, Jong gun · Kwak, Kae Hwan

### Abstract

The relation of cycle loading to deflections on the mid-span, the crack propagation and the modes of failure according to cycle number, fatigue life and S-N curve were observed through the fatigue test. Based on the fatigue test results, high-strength reinforced concrete beams failed to 57~66 percent of the static ultimate strength. Fatigue strength about two million cycles from S-N curves was certified by 60 percent of static ultimate strength.

### I. 서 론

최근, 자동차 교통량의 증가와 차량하중의 증대로 인한 RC 구조물 손상이 많이 발생한다. 이들 손상원인은 하중조건, 구조조건, 시공조건 등이나 일반적으로 과다, 과적차량 등 피로에 의한 안전성 및 내하력 저하가 주원인 이다. 재료의 피로파괴는 반복되는 응력 또는 변형을 받아 정적파괴 응력보다 훨씬 낮은 응력에서 발생하고 대부분 급작스런 취성파괴 양상을 나타낸다. 종래에는, 콘크리트 구조물의 피로파괴 현상은 단순히 반복하중에 있어서 재료강도의 관점에서 얻은 동결융해 등 기상작용이나 화학작용에 대한 재료적 내구성과 염해에 의한 철근의 부식 등 구조적 내구성으로 구별되며 취급되어 왔으나 최근에는 변동 반복하중에 의한 콘크리트 구조물의 성능열화현상인 피로현상을 내구성 문제로서 생각할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 고강도 철근콘크리트 보의 구조적인 피로거동을 파악하기 위하여 피로실험을 통하여 반복횟수와 처짐관계, 반복횟수와 변형률관계 그리고 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상을 관찰하였으며 피로수명과 반복횟수의 관계를 정립하기 위하여 S-N곡선을 작성하였다.

### II. 실험계획

#### 1. 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 Type I 인 보통포틀랜드시멘트 이었다. 잔골재는 금강에서 채취

---

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집(1998년 10월 24일)

된 강모래로서 비중은 2.62, 조립율은 2.75이었고, 굵은골재의 최대치수가 19mm, 25mm인 쇄석을 사용하였다. 고강도 콘크리트를 발현하기 위하여 실리카흙을 사용하였다. 감수제는 암갈색의 액상으로 비중이 1.21, pH 8.0인 Powercon-100을 사용하였다. 보의 시험체에 사용된 철근은 이형철근으로써 비교적 고강도인 KSD 40철근을 사용하였으며 인장철근의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of reinforcement

Bar size	Nominal area (cm <sup>2</sup> )	Yield strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Ultimate tensile strength(kg/cm <sup>2</sup> )	Modulus of elasticity(kg/cm <sup>2</sup> )
D10	0.713	2,777	4,067	2.04×10 <sup>4</sup>
D19	2.865	4,150	5,020	2.04×10 <sup>4</sup>

## 2. 배합설계

고강도 콘크리트의 배합은 보통 콘크리트 보다 낮은 물-시멘트비를 적용함으로 워커빌리티가 좋지않아 감수제 사용이 불가피하다. 따라서 혼화제로서 고성능감수제를 사용하면 낮은 물시멘트비와 높은 슬럼프를 얻을 수 있다. 또한 콘크리트의 강도 발현에 중대한 영향을 미치는 굵은골재의 최대치수를 신중히 결정하여야 한다. 이에 대한 배합설계는 Table 2와 같다.

Table 2. Concrete mix proportion

Max. size (mm)	Slump (cm)	W/C+SF (%)	S/a (%)	Repla. pro. of SF (%)	Unit volume(kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	SF	S	G	SP
19	10±2	27	35	10	160	533	59.2	610	1133	1.0%

## 3. 공시체 제작 및 측정

강도실험용 공시체 제작은  $\phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하였으며 원주형 몰드에 3층으로 나누어 채우고 각층마다 25회씩 다짐을 실시하는 등 콘크리트를 KSF 2403 규정에 따라 제작하였다. 고강도 콘크리트의 강도측정에 따른 공시체의 편심량을 방지하기 위하여 공시체면을 평활하게 함이 중요하므로 본 실험에서는 연마기로 공시체의 가압면을 마무리하였다. 공시체 제작 1일후 몰드를 탈형하여 20±2 °C 상온에서 표준수중양생을 실시하여 3일, 7일, 28일, 56일에서의 압축강도와 재령 28일 인장강도를 측정하였다. 콘크리트 공시체의 압축강도 및 인장강도는 습윤양생한 공시체를 꺼내어 표면의 물기를 닦고 시험기에 장치한 후 KSF 2405, KSF 2423의 규정에 의해 하중을 매초 2.5kg/cm<sup>2</sup>의 일정한 속도로 재하하여 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 콘크리트 강도측정을 위하여 200ton 용량의 만능시험기를 사용하였다.

## 4. 시험체 제작

휨과 전단을 받는 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 피로에 대한 거동을 파악하기 위하여 단면 15×30×190cm의 시험체를 제작하였다. 피로실험에서 각 부재에 대한 AS, BS, CS는 전단보강철근비가 0, 50, 100%인 시편이다. 각 시편의 하중에 따른 철근의 변형율을 측정하기 위하여 인장철근 및 전단보강철근에 스트레인 게이지를 부착하였다. 본 실험에서 사용한 스트레인 게이지의 저항은 120±0.4 $\Omega$ , 게이지 Factor 값은 2.10, 2.09 이다. Fig. 1은 고강도 철근콘크리트 보의 피로실험부재의 제원 및 스트레인 게이지 부착 위치관계를 나타냈다.

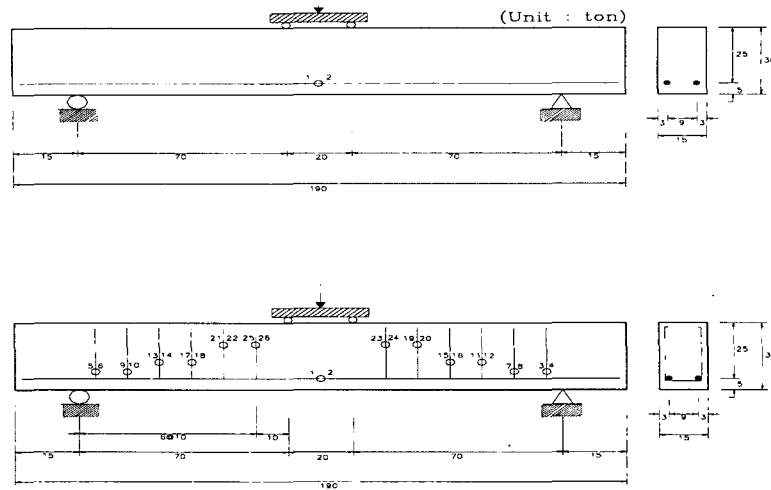


Fig. 1 Cross-section of fatigue test beams and loading arrangement(unit : cm)

### III. 재하 및 실험방법

본 피로실험기는 M & N T Korea사 제품으로 전기 유압서보 구조용 피로실험기로서 최대 용량 50ton(stroke =  $\pm 150$ mm)이었다. 본 피로실험기는 Load frame, 유압펌프, Power supply 및 Control box 등 크게 3 부분으로 구성되었다. 재하방법으로 하중제어나 변위제어로 구분된다. 가력방법은 4점 재하실험으로 피로실험의 재하속도는 초기 1회에서 6회까지 정적하중을 재하 하였으며 그 이후에는 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하였고 재하속도는 5Hz(300 C/min)로 고정하여 100회, 1000회, 10,000회, 20,000회, 30,000회, 50,000회, 100,000회로 그리고 매 십만번씩 측정단위로 하여 200만회 전후로 측정하는 것을 원칙으로 하였다. 반복파형은 정현(sine)파로 하였으며 반복하중의 재하는 하중조절방식(Load control)을 채택하였다. 최저 응력수준과 최고 응력수준의 비율인 응력비  $R=0.3$ 으로 일정하게 하였다. 동적 변형률 데이터 장비로서 Dynamic strain meter MT-16 측정기를 사용하였다. 피로실험 설치모습의 실험 개략도는 Fig. 2와 같다.

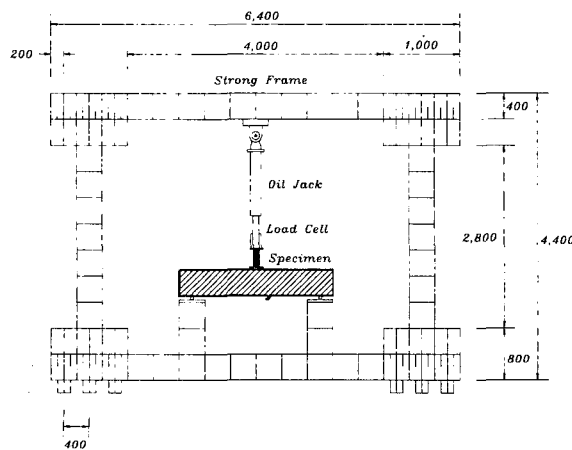


Fig. 2 Test set-up for fatigue

#### IV. 실험결과 및 고찰

##### 1. 강도측정결과

본 실험에서는 물결합재비(W/c+sf) 27%에서 활렬인장강도와 압축강도의 비는1/14.9으로 나타났다. 압축강도와 활렬인장강도의 관계는 Table 3와 같다.

Table 3 Test results of compressive strength and tensile strength

W/C+SF	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )				Tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	f'/f'sp
	3-day	7-day	28-day	56-day	28-day	
27	483	650	790	863	53	14.9

##### 2. 피로강도와 S-N곡선

피로실험은 일반적으로 주어진 반복횟수에 저항할 수 있는 정적극한하중의 비율로 나타낸다. 즉, 응력 S와 파괴까지의 반복횟수 N와의 관계로서 표시된다. 이 곡선을 S-N 곡선 이라고 한다. 콘크리트의 피로파괴에 있어서 응력의 수준은 응력-피로수명 곡선으로 나타낸다. 여기서 종축은 응력을 횡축은 파괴시 까지의 반복횟수를 대수눈금으로 나타낸다. 피로강도는 응력의 수준, 최대응력, 최소응력, 응력진폭, 재료특성에 따라서 영향을 받는다. 피로실험결과 Table 4에 정리하였다.

여기서 R\*는 정적극한하중과 최대반복하중의 비율, Sr는 응력범위, Nu는 부재의 파괴시 반복횟수, Pmax는 최대반복하중, Pmin는 최소반복하중, Pcr 초기 사인장균열하중, Pfc 초기 휨균열하중, T는 인장철근의 절단, S는 스테럽의 절단이다.

Table 4 Fatigue test results

Name of beams	Pmin (t)	Pmax (t)	R*	Min stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Max stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Stress range (kg/cm <sup>2</sup> )	Pu (t)	Nu (cycle)	Pfc (t)	Pcr (t)	Failure mode
HIIAF1	2.88	9.6	0.70	4.17	13.91	9.74	13.7	1,100	2.1	13.0	Shear
HIIBF1	5.19	17.28	0.60	7.52	25.04	17.52	28.8	1,121,000	1.5	11.5	Shear (S,T)
HIIBF2	5.72	19.05	0.65	8.29	27.61	19.32	29.3	854,000	2.1	12.8	Shear (S)
HIICF1	5.84	19.47	0.55	8.46	28.22	19.76	35.4	3,211,000	1.3	11.7	Flexure
HIICF2	7.29	24.28	0.68	10.56	35.19	24.63	35.7	1,231,000	1.8	12.6	Flexure (T)
NIIF1	1.72	5.74	0.60	2.29	7.65	5.36	9.57	2,793,000	1.96	7.23	Shear
HIIF1	2.14	7.14	0.60	2.85	9.52	6.67	11.91	4,260	2.21	9.80	Shear
UHIF1	2.87	9.55	0.60	4.16	13.84	9.68	15.91	1,496,000	2.05	12.80	Shear

##### 3. 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상

Fig. 3은 고강도 철근콘크리트 보의 반복횟수 증가에 따른 균열성장과 파괴양상을 나타냈다. 본 실험결과로 부터 HIIBF1 시편은 반복횟수 1,121천회에서 인장철근과 전단보강철근이 동

시에 파괴파단 되었고, HIIBF2 시편은 반복횟수 854천회에서 전단보강철근에 의해서 파괴파단 되었으며 모두 사인장균열에 의한 사인장파괴 되었다. HIICF1 시편은 반복횟수 3,211천회 이상의 반복하중을 견디었고 휨균열에 의한 휨파괴 파괴 양상을 보였다. HIICF2 시편은 반복횟수 1,231천회에서 인장철근의 파괴파단으로 휨균열에 의한 휨파괴 되었다. 이와 같은 인장철근 및 전단보강철근의 파괴파괴는 균열부의 응력집중으로 인하여 철근이 과도한 피로하중을 받으며 최종적으로 철근자체가 파단되어 부재가 파괴되는 양상을 보였다. 이와 같이 피로하중을 받는 고강도 철근콘크리트 부재는 매우 심각한 영향을 주게 되므로 실제 구조물에서 피로파괴가 발생하게 되면 부재에 상당한 위험을 수반하게 될 것으로 판단된다.

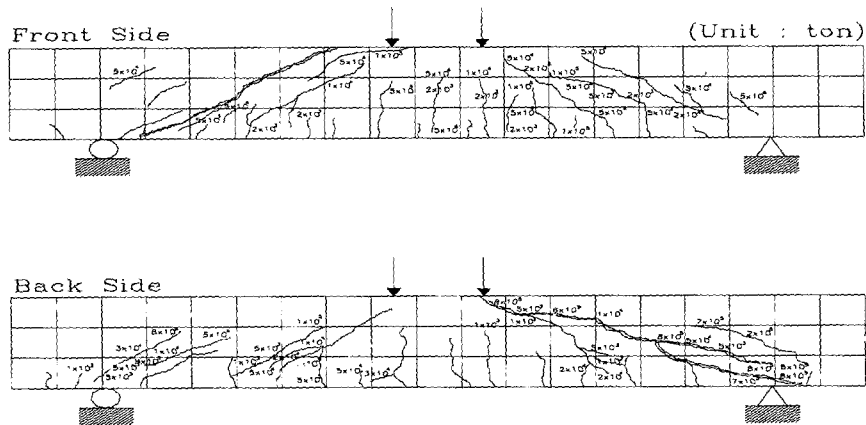


Fig. 3 Crack growth pattern of HIIBF2

#### 4. 반복횟수와 처짐관계

Fig. 4에서는 반복횟수와 변형률관계를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 최대하중(Pmax)와 최소하중(Pmin)으로 부터 각각의 부재에 대한 작용하중의 범위를 알 수 있다. 반복하중의 작용시 초기휨균열이 발생하는 1~100회 사이에 상당한 처짐의 증가를 보이다가 그 이후로 반복횟수가 점점 증가함에 따라 처짐은 미세하게 증가하는 추세를 보였다.

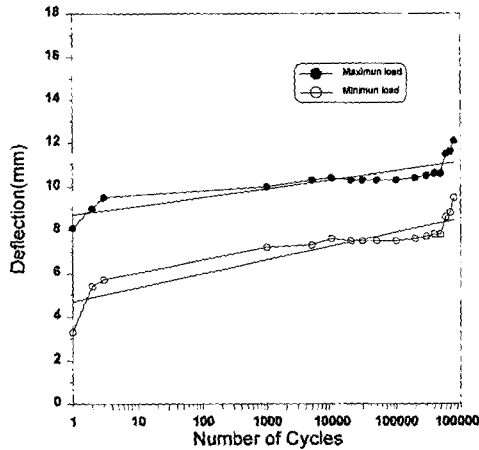


Fig. 4 Number of cycles-deflection relation of HIIBF2

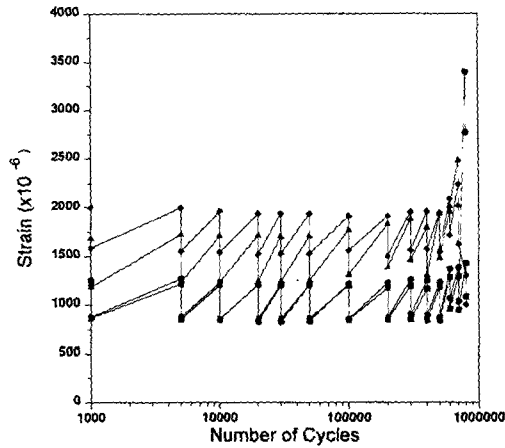


Fig. 5 Number of cycles-longitudinal steel strain relation of HIIBF2

## 5. 반복횟수와 변형율관계

Fig. 5에서는 반복횟수와 변형율관계를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 반복하중에 의한 인장철근의 변형율은 재하 초기에 큰 변화를 보이고 반복횟수가 증가 할수록 일정한 변동폭으로 아주 조금씩 증가하다가 인장철근의 항복점에 도달했을 때 큰 증가를 나타냈다. 전단보강철근의 변형율은 사인장균열이 발생하는 지점에서 상당히 큰 폭으로 증가하기 시작하였고 이러한 변형율의 증가는 파괴직전까지 계속되었다.

## V. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보에 대하여 피로실험을 수행하였다. 고강도 철근콘크리트 보의 피로실험을 통하여 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상, 반복횟수와 처짐관계, 반복횟수와 변형율 관계, 피로강도와 S-N 곡선 등을 분석한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 물결합재비(W/c+sf)가 27% 범위에서 혼화재인 실리카흄 혼입을 10% 정도 혼입한 경우 재령 28일의 압축강도가  $790\text{kg}/\text{cm}^2$  이었다. 고강도 콘크리트의 압축강도에 대한 할렬인장강도비는 1/14.9으로 나타내어 고강도 콘크리트의 인장강도는 크게 향상되지 않고 있음을 확인할 수 있었다.
2. 피로실험결과 고강도 철근콘크리트 보는 정적극한강도의 57~66%에서 파괴되었다.
3. S-N 곡선으로 부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 60% 전후임을 확인 할 수 있었다.
4. 반복하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보의 균열 및 파괴양상은 균열이 성장하면서 휨파괴 및 전단파괴의 양상으로 나타났다.

## 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, March 1974, pp.97~121.
2. ACI Committee 363, "State of the Art Report on High-Strength Concrete", ACI Journal, Vol.81, No.4, July-August 1984, pp.364~411.
3. K. H. Kwak, J. Suh and C. T. T. Hsu, "Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", Second CANMET/ACI International Concrete on Durability of Concrete, Montreal Canada, 1991, pp.369~384.
4. T. S. Chang and C. E. Kesler, "Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beam", Journal of ACI, Vol.55, August 1958, pp.245~254.
5. T. S. Chang and C. E. Kesler, "Static and Fatigue Strength in Shear of Beams with Tensile Reinforcement", Journal of ACI, Vol.54, June 1958, pp.1033~1057.
6. T. Ueda and H. Okamura, "Behavior in Shear of Reinforced Concrete Beams under Fatigue Loading", Journal of the Faculty of Engineering University of Tokyo, Vol.37, No.1, 1983, pp.17~48.