

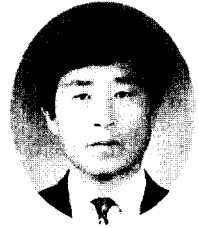
고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단피로거동에 관한 연구

A Study on Shear-Fatigue Behavior of
Reinforced Concrete Beams using High Strength Concrete



곽 계 환*

Kwak, Kae-Hwan



박 종 건**

Park, Jong-Gun

ABSTRACT

Recently, as the building structure has been larger, higher, longer and more specialized, the demand of material with high-strength concrete for building has been increasing. In this research, silica-fume was used as an admixture in order to get a high-strength concrete. From the test result, High-strength concrete with cylinder strength of 1.200kgf/cm^2 in 28-days was produced and tested. The static test was carried out to measure the ultimate load, the initial load of flexural and diagonal cracking, crack patterns and fracture modes. The load versus strain and load versus deflection relations were obtained from the static test. 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.

Keywords : high-strength concrete, static test, S-N curve, fatigue strength, diagonal cracking, load-deflection, load-strain.

* 정회원, 원광대학교 토목환경공학과 교수·공박
** 정회원, 금강농지개발조합·공박

·본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로 보
내 주시면 2000년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

우리나라는 70년대의 급속한 산업발전과 더불어 건설되었던 교량들은 설계하중의 증대와 교통량 및 중차량의 증가로 계속되는 반복하중에 의한 재료의 누적손상 등 여러가지 원인으로 인하여 성능저하 현상이 가속화되어 가고 있다.⁽¹⁾ 토목, 건축분야의 건설재료로 광범위하게 사용되고 있는 콘크리트는 신소재 개발 및 시공기술 등의 향상에 힘입어 구조물은 대형화 되어가고 고강도화로 재료의 사용에서 비롯된 부재단면의 경박화가 이루어지고 있다.⁽²⁾ 본 연구에서는 고강도 철근콘크리트 보의 전단피로거동을 파악하기 위하여 정적실험과 피로실험으로 대별했다. 정적실험에서는 보의 극한하중, 초기 휨균열하중 및 초기 사인장균열하중 등을 측정하고 하중과 철근의 변형률관계, 하중과 처짐관계, 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상 등을 분석하였다. 피로실험에서는 반복횟수와 처짐관계, 반복횟수와 변형률관계 그리고 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상을 관찰하였고 피로실험결과로부터 피로수명과 반복횟수의 관계를 정립하기 위하여 S-N곡선을 작성하였다. 따라서, 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단피로거동에 대하여 실험적 연구를 통하여 구조물의 파괴에 미치는 원인을 규명하고자 하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료 및 배합

본 실험에 사용한 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트이었다. 잔골재는 금강에서 채취된 강모래로서 비중은 2.62, 조립률은 2.75이었고, 굵은 골재의 최대치수가 19mm 쇄석을 사용하였다. 실험체 제작에 사용된 철근은 이형철근으로서 인장철근은 D19mm, 전단보강철근에 사용된 철근은 D10mm를 사용하였다. 고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 시험배합을 통해 최적배합비를 얻었으며, 고성능감수제의 첨가량은 슬럼프값이 10±

2cm가 되도록 조절하여 사용하였다. 혼화제로서 실리카흄을 사용하였으며 사용한 제품은 노르웨이산 Elkem microsilica 초미분말 실리카 제품이다. 또한 고성능감수제는 암갈색의 액상으로 비중이 1.21, pH 8.0인 Power con-100을 사용하였다. 이에 대한 배합설계 결과는 Table 1과 같다.

고강도 콘크리트의 압축강도와 쪼갬 인장강도를 측정하기 위해서 $\phi = 10 \times 20$ cm 실린더를 사용하였다. 압축강도는 KS규격과 ASTM의 규격에 따라 실험을 실시하였고, 같은 규격에 따라 쪼갬 인장강도 실험을 하였다. 본 실험에서 물결합재비에 따라 세가지 시리즈로 분류하여 N-시리즈는 $W(C+SF) = 49.7\%$, H-시리즈는 $W/(C+SF) = 27\%$, UH-시리즈는 $W/(C+SF) = 18\%$ 로 하여 쪼갬 인장강도와 압축강도의 비는 1/8, 1/14.9, 1/19.6으로 나타났다. 압축강도와 쪼갬 인장강도의 관계는 Table 2와 같다.

2.2 실험변수

본 실험에서는 고강도 철근콘크리트 보의 전단피로거동을 파악하기 위하여 전단거동에 영향을 미치는 인자인 콘크리트의 압축강도(f_{cu}), 전단지간비(a/d), 인장철근비(ρ_w), 전단보강철근의 유무 등으로 주요 실험변수로 하였다. 콘크리트의 압축강도를 320kgf/cm², 790kgf/cm², 1,158kgf/cm²의 3가지로 구분하였다. 또한 보의 전단지간비(a/d)를 1.5, 2.8, 3.6의 3종류로 변화시켜 전단철근이 없는 경우와 전단철근이 있는 경우로 구분하여 고강도 철근콘크리트 보에 미치는 영향을 파악하였다. 각 각의 인장철근비는 1.53%와 3.05% 이다.

2.3 실험체 제작

휨과 전단을 받는 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단피로거동을 규명하기 위하여 단면 15×30cm인 보를 전단지간 길이별로 다르게 제작하였다. 실험의 주요 변수들을 고려하

Table 1 Mix proportion of concrete

Concrete types	Max. size (mm)	Slump (cm)	W/(C+SF) (%)	S/a (%)	Replacement proportion of SF (%)	Mix proportions(kgf/m ³)					
						W	C	SF*	S	G	SP**
Normal strength concrete(N)	25	10±2	49.7	43.3	-	165	332	-	790	1034	-
High strength concrete(H)	19	10±2	27	35	10	160	533	59.2	610	1133	1.0%
Ultra high strength concrete(UH)	19	10±2	18	35	15	160	750	132.3	512	949	2.0%

*SF : Silica fume, **SP : Superplasticizers

Table 2 Relation between compressive strength and splitting tensile strength

Series	W/(C+SF) (%)	Compressive strength (f _{cu}) kgf/cm ²				Tensile strength (f _{sp}) kgf/cm ²	f _{cu} /f _{sp}
		3-days	7-days	28-days	56-days	28-days	
Normal strength concrete(N)	49.7	204	241	320	372	39	8.2
High strength concrete(H)	27	483	650	790	863	53	14.9
Ultra high strength concrete(UH)	18	875	1,021	1,158	1,208	59	19.6

여 실험체를 제작하였으며 Table 3과 같다. 하중 및 반복횟수에 따른 철근의 변형률을 측정하기 위하여 인장철근 및 전단보강철근에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 사용된 스트레인 게이지의 저항은 120±0.4Ω, 게이지 계수 값은 2.10, 2.09 였다. 보의 실험부재의 치수 및 스트레인 게이지 부착 위치는 Fig.1에서 보는 바와 같다.

2.4 실험방법

2.4.1 실험장비

정적실험은 200ton용량의 유압식 U.T.M을 사용하여 하중속도를 일정하게 유지하면서 실험체가 파괴될 때까지 분당 1.0ton씩 증가시켜 하중을 재하하였다. 피로실험은 M & T Korea사 제품으로 전기 유압서보 구조용 피로실험기로서 최대용량이 50ton(stroke=±150mm), 주기(frequency)는 10Hz 이었다.

2.4.2 재하방법

본 실험에서는 고강도 철근콘크리트 보의 전단 피로거동에 관한 실험으로서 하중의 재하점 간격을 20cm로 하였으며 단순지지 조건에서 재하하

였다. 가력방법은 4점 재하실험으로 피로실험의 재하는 초기 1회에서 10회까지 정적하중을 재하하였으며 그 이후에는 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하였다. 반복하중에 의한 재하속도는 5Hz(300 cycles/min)로 고정하였다. 하중재하점은 고무패드를 깔아 하중의 전달을 이상적으로 유도하였다. 반복파형은 정현(sine)파로 하였으며, 재하방법은 하중제어방식을 이용하였다. 최저 응력수준과 최고 응력수준의 비율인 응력비 R=0.3으로 일정하게 하였다.

2.4.3 측정방법

실험에 앞서 모든 실험체는 백색 페인트를 도포후 부재의 표면에 10cm간격으로 가로줄과 세로줄을 그어 콘크리트의 균열성장 과정을 측정할 수 있도록 하였다. 정적실험에서는 보의 처짐을 측정하기 위하여 보의 중앙부에 다이알 게이지를 설치하였고, 로드셀에 장착형인 LVDT를 설치하여 하중과 변위를 직접 측정한 후 STA 소프트웨어를 이용하여 개인휴대용 컴퓨터에 저장하였다. 정적변형률 측정기는 TDS-601A를 사용하였다. 피로실험에서는 초기 1회에서 10회까지 정적하중을 재하하였으며 그 이후에는 100회, 1000회,

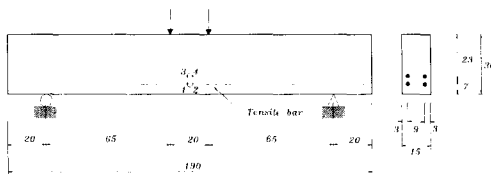
10,000회, 20,000회, 30,000회, 50,000회, 100,000회로 그리고 매 십만번씩 측정단위로 하여 200만회 전후로 측정하는 것을 원칙으로 하였다.

동적변형을 데이터 장비로서 M & T Korea사 제품인 동적변형(Dynamic strain meter MT-16) 측정기를 사용하였다. 피로실험 광경은 Fig. 2와 같다.

Table 3 Details of test specimen

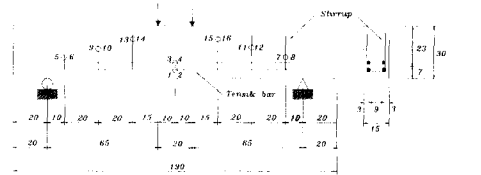
Type	Series	Name of beams	f_{cu} (kgf/cm ²)	Tensile steel ratio ($\rho_w, \%$)	Spacing of shear reinforcement (cm)	Shear span-depth ratio (a/d)
Static test	N-series	NIS1	320	1.53	Without	1.5
		NIS2			10	
		NIIIS3			Without	2.8
		NIIIS4				
		NIIIS5			Without	3.6
		NIIIS6				
	H-series	HIS1	790	3.05	Without	1.5
		HIS2			10	
		HIIS3			Without	2.8
		HIIS4				
		HIIS5			Without	3.6
		HIIS6				
	UH-series	UHIS1	1158	3.05	Without	1.5
		UHIS2			10	
		UHIIIS3			Without	2.8
		UHIIIS4				
		UHIIIS5			Without	3.6
		UHIIIS6				
Fatigue test	H-series	HIIAF1	790	3.05	Without	2.8
		HIIAF2			Without	
		HIIBF1			10	
		HIIBF2			10	
		HIICF1			10	
		HIICF2			10	
		HIIIAF1			Without	3.6
		HIIIAF2				

- S: Static test, F: Fatigue test
- N: Normal strength concrete, H: High strength concrete, UH: Ultra high strength concrete
- I, II, III: Shear span-depth ratio(a/d=1.5, 2.8, 3.6)
- A, B, C: Without and with shear reinforcement(A: none, B: six-stirrups, C: twelve stirrups)
- S1, S2, S3 . . . F1, F2 . . .): Beam number

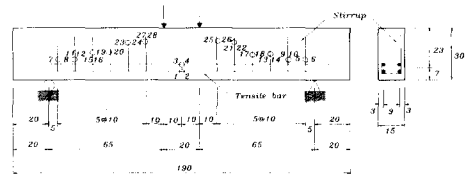


(a) None

"O" : The location of steel gages



(b) Six-stirrups



(c) Twelve stirrups

Fig. 1 Shape of test beams and loading arrangement(unit:cm)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정적실험

3.1.1 전단강도

본 실험에서는 각각의 보에 대하여 휨균열과 전단균열이 최초로 발생되었을 때 초기균열하중 및 극한하중을 측정하였다. 초기 사인장균열하중을 기준으로 전단응력을 구하였으며, 정적실험 결과는 Table 4와 같다. 콘크리트의 압축강도(f_{cu}), 전단지간비(a/d), 인장철근비(ρ_w), 전단보강철근의 유무 등으로 주요 실험변수로 한 고강도 철근콘크리트 보의 실험결과 전단균열강도와 극한 전단강도는 보통강도에서 대체로 ACI 기준식 보다 큰 값을 나타내었으나 고강도 일수록 그 증가율이 감소하였다.

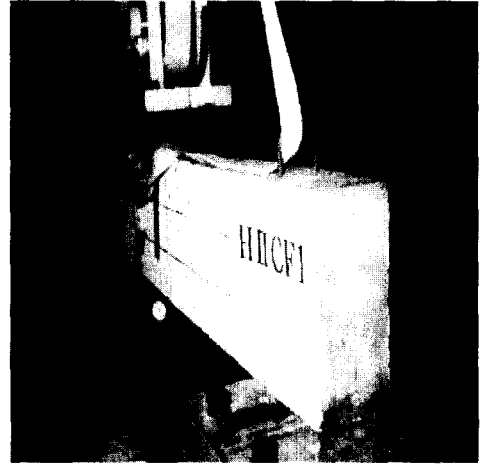


Fig. 2 Test specimen in the loading frame

Table 4 Results of static test

Series	Name of beams	f_{cu} (kgf/cm ²)	Spacing of shear reinforcement (cm)	Shear span-depth ratio (a/d)	P_c (tf)	P_{cr} (tf)	P_u (tf)	$V_{cr,ACI}$ (kgf/cm)	$V_{cr, Test}$ (kgf/cm)	$\frac{V_{cr, Test}}{V_{cr, ACI}}$	Failure mode
N - series	NIS1	320	Without	1.5	3.99	10.61	19.29	9.48	14.14	1.49	Shear
	NIS2		10	1.5	5.04	11.68	31.79		15.57	1.64	Shear
	NIIS3		Without	2.8	2.30	8.28	11.13		11.04	1.16	Shear
	NIIS4		10	2.8	2.04	9.11	14.94		12.14	1.28	Shear
	NIIS5		Without	3.6	1.96	7.23	9.57		9.64	1.02	Shear
	NIIS6		10	3.6	2.03	8.26	12.89		11.01	1.16	Flexure
H - series	HIS1	790	Without	1.5	5.99	12.44	35.39	14.89	16.58	1.11	Shear
	HIS2		10	1.5	6.19	13.91	37.44		18.54	1.25	Shear
	HIIS3		Without	2.8	3.38	10.16	12.79		13.54	0.91	Shear
	HIIS4		10	2.8	3.59	10.98	19.14		14.64	0.98	Flexure
	HIIS5		Without	3.6	2.21	9.80	11.91		13.06	0.88	Shear
	HIIS6		10	3.6	2.28	11.10	15.62		14.80	0.99	Flexure
UH - series	UHS1	1,158	Without	1.5	3.79	13.01	30.17	18.03	18.85	1.05	Shear
	UHS2		10	1.5	3.91	13.35	51.56		19.34	1.07	Shear
	UHIS3		Without	2.8	3.08	12.70	13.77		18.40	1.02	Shear
	UHIS4		10	2.8	2.02	11.87	29.98		17.20	0.95	Flexure
	UHIS5		Without	3.6	2.05	12.80	15.91		18.55	1.03	Shear
	UHIS6		10	3.6	2.38	13.20	25.48		19.10	1.06	Flexure

f_{cu} : Compressive strength of concrete

P_c : First flexural cracking load

P_u : Static ultimate load to failure

P_{cr} : First diagonal cracking load

3.1.2 하중과 처짐 관계

보의 처짐은 초기에는 하중에 비례해서 비교적 직선적으로 변화함을 알 수 있었다. 하중이 증가하면서 직선관계 양상이 변하였다. 휨과 사인장균열이 발생하여 보의 강성을 감소시켜 처짐이 증가했다. 또한 파괴 직전에 있어서는 하중이 증가될 때 처짐이 급격히 증가했다. 균열발생 이전의 처짐은 하중이 증가함에 따라 선형적으로 증가하다가 사인장 균열이 발생한 이후에는 콘크리트의 균열성장으로 인한 강성의 감소로 처짐에 대한 저항력이 약화되어 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. Fig. 3로부터 Fig. 5까지에서 보는 바와 같이 실험에서 사용된 모든 보의 초기 처짐의 기울기는 전단지간비(a/d)로 각각 다르게 나타났다. 사인장균열이 발생하기 전에는 보의 거동은 선형적이고 보의 처짐은 보의 길이에 따라 변화하였다. 전단지간비(a/d) 1.5인 짧은 보에서는 처짐의 변화가 작으나 전단지간비(a/d) 2.8과 3.6인 보에서는 처짐의 변화가 심하였다. 보통강도 콘크리트 보에서의 하중과 처짐 곡선을 비교할 때 동일한 처짐에서 고강도 콘크리트인 보일 수록 하중이 더 커짐을 알 수 있었으며, 이는 고강도 콘크리트에서 단면의 휨강성이 커지기 때문이다.

3.1.3 하중과 변형률 관계

보의 변형률은 철근에 부착한 스트레인 게이지를(steel strain gages) 이용하여 측정하였다. 각 각의 실험체에 대한 하중과 인장철근의 변형률 관계는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같고, 하중과 전단보강철근의 변형률관계는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. 하중과 변형의 관계 곡선에서 나타난 바와 같이 전단보강철근의 변형률은 사인장균열 이전에는 거의 나타나지 않고 사인장균열 이후에 급격히 증가함을 알 수 있었다. 대부분의 보에서 전단철근의 변형률은 전단균열발생에 이르기까지는 "0"에 가까운 값으로 나타났다. 전단보강철근의 변형률이 급격히 증가하는 부위는 전단지간의 중앙부이며 양쪽 전단지간에서 최초로 발생한 사인장균열 부분이었다. 이것으로부터 사인장균열이

발생한 지점의 스테럽이 외력에 대한 하중을 더 부담한다는 사실을 확인할 수 있었다. 전단보강철근의 변형률은 콘크리트의 압축강도 수준에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 보통강도 철근콘크리트 보에서는 전단보강철근은 항복하지 않은 것으로 나타났으나 고강도 철근콘크리트 보에서의 전단보강철근은 거의 항복한 것으로 나타났다. 따라서 전단보강철근의 전단능력이 보통강도 철근콘크리트 보에서는 실제로 전단능력의 역할은 다하지 못하나 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 최소 전단철근량의 보강효과가 기대된다.

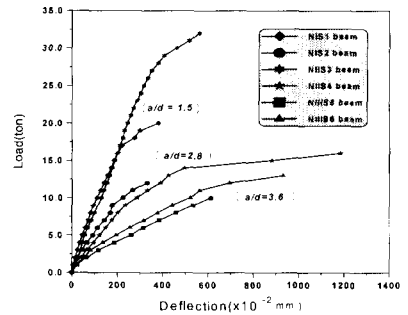


Fig. 3 Load-deflection curves of N-series beams

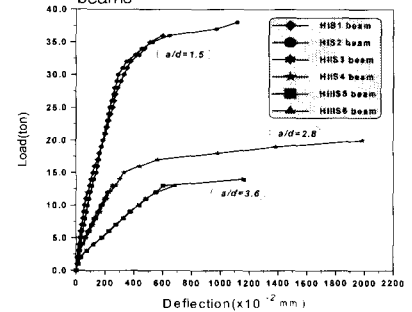


Fig. 4 Load-deflection curves of H-series beams

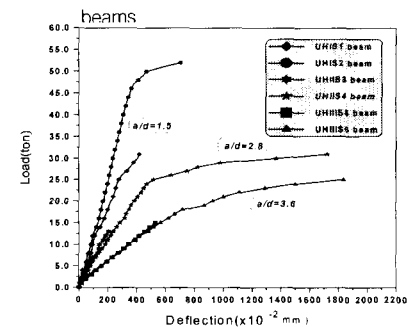


Fig. 5 Load-deflection curves of UH-series beams

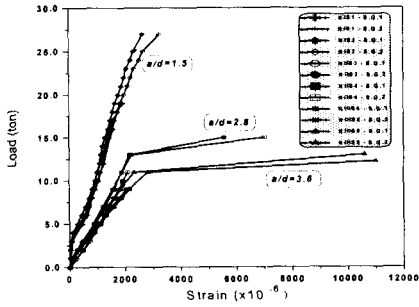


Fig. 6 Load vs tensile steel strain of N-series beams

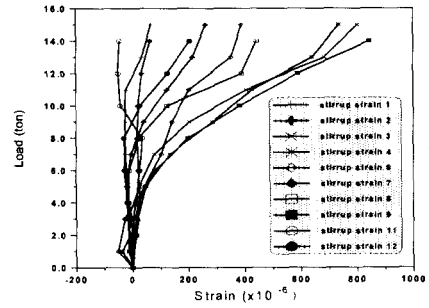


Fig. 8 Load vs stirrup strain of NIS4

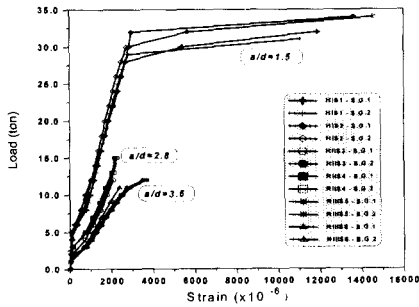


Fig. 7 Load vs tensile steel strain of H-series beams

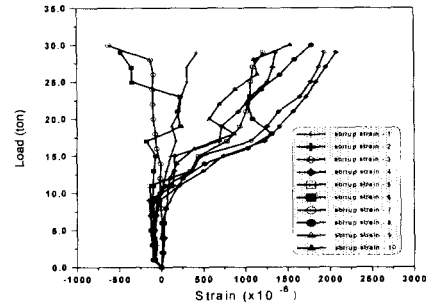


Fig. 9 Load vs stirrup strain of UHIS4

3.1.4 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상
 고강도 철근콘크리트 보에 대하여 전단보강철근 유무로 구분하여 하중증가에 따른 균열성장을 나타내면 Fig. 10과 같다. 하중의 증가에 따라 전단지간내의 복부중앙에서 단독으로 급작스럽게 발생하거나 중앙에서 1.0d~1.5d만큼 떨어진 지점에서 사인장균열은 휨균열 끝에서 발달하며 성장하였다. 이와 같이 발생한 사인장균열은 하중이 증가됨에 따라 윗부분의 균열선단은 하중점을 향하였고 아랫부분의 균열선단은 받침점을 향하여 동시에 성장하였다. 전단보강철근이 있는 경우 균열은 복잡한 양상을 보이고 주균열의 간격이 줄어드는 대신 균열수가 증가하였으며, 전단보강철근이 없는 보에서는 휨균열의 간격이 넓고 주균열 수도 적은 것으로 나타났다. 휨균열은 어느 정도 수준에서 균열이 멈추었으며 파괴에 미치는 영향은 아주 작았다. 또한 사인장균열은 하중의

증가에 따라 전단보강철근이 없는 경우에는 초기 사인장균열이 발생한 후 약간의 하중을 재하하여도 매우 빠르게 파괴되는 경향을 보였다.

보통강도 철근콘크리트 보의 휨파괴인 경우에는 압축측에서 콘크리트가 서서히 파괴되었으나 고강도 및 초고강도 철근콘크리트 보에서는 급작스럽게 콘크리트의 압축파괴 현상이 나타남을 알 수 있었는데 이는 고강도 콘크리트의 취성 특성에 기인한 것으로 사료된다. 전단지간비(a/d)에 의해 파괴양상이 달라 전단지간비(a/d)가 1.5인 보에서는 아치리브의 파괴 또는 사균열의 확대에 따라 최종파괴에 도달했으며, 전단지간비(a/d)가 2.8인 보에서는 사인장파괴가 발생하고 전단지간비(a/d)가 3.6인 보에서는 사인장파괴와 휨인장파괴가 일어났다. 고강도 콘크리트일수록 파괴양상은 취성적으로 나타났고 이때 콘크리트의 파단면은 굴곡이 없고 매끈한 면을 가졌다.

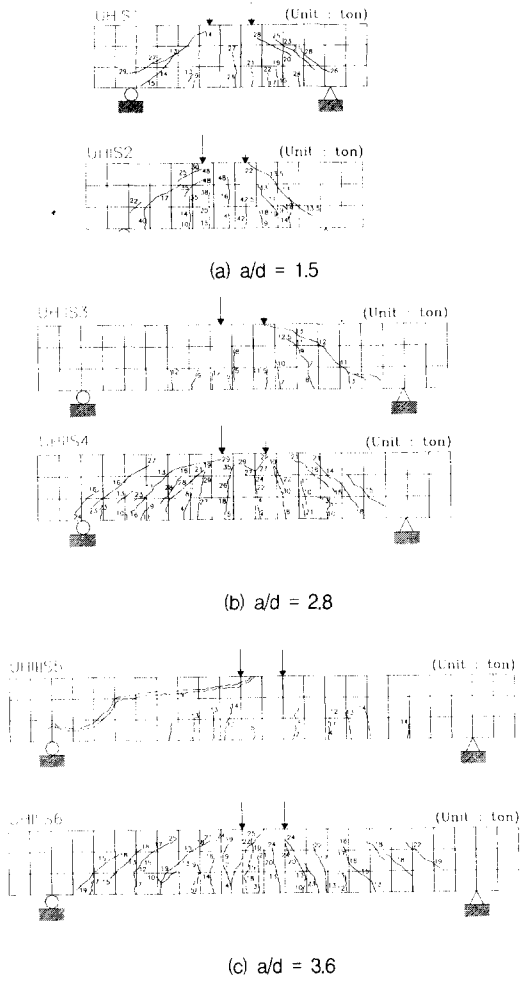


Fig. 10 Crack growth pattern of beams

3.2 피로실험

3.2.1 피로강도와 S-N 곡선

고강도 철근콘크리트 보의 전단피로거동 특성을 실험적으로 규명하기 위한 것으로서 피로실험 결과는 Table 5와 같다. 본 실험에서 얻은 피로실험결과 고강도 철근콘크리트 보의 정적극한강도의 57~66%에서 파괴되었고 S-N 곡선으로부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적 극한강도의 60% 전후라고 판단된다. Fig. 11에서는 실험값 전체를 S-N 상관관계를 도식화한 것이다. 피로실험결과 각각의 부재에 대한 피로수명과 피로강도 관계식은 지수형태의 함수로 나타낼

수 있다. 그리고 적용된 작용응력과 반복횟수와 관계식은 다음과 같다.

$$Y = B \times \log(X) + A \text{-----} (1)$$

여기서, A와 B는 실험에 의해 결정되는 상수이다. 위의 식을 다음과 같은 형태로 바꾸어 실험결과로부터 얻은 결과값을 정적 극한하중에 대한 피로하중백분율(S)인 피로강도와 피로수명(N)은 Fig.11에 나타냈으며 각 실험체에 대한 피로수명과 피로강도 관계를 회귀분석하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$S = - 6.22051 \times \log(Nu) + 150.135 \text{-----} (2)$$

$(R^2 = 0.495)$

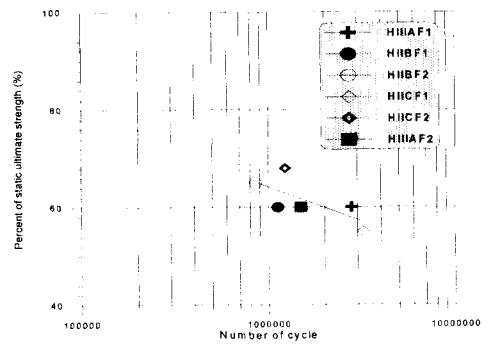


Fig. 11 S-N curve

3.2.2 반복횟수와 처짐 관계

Fig. 12에서 Fig. 13까지는 반복횟수와 중앙 처짐 관계를 나타냈고 여기에서 최대하중(Pmax)과 최소하중(Pmin)으로 부터 각각의 부재에 대한 작용하중의 범위를 알 수 있다. 반복하중의 작용시 초기 휨균열이 발생하는 1~100회 사이에 상당한 처짐의 증가를 보이다가 그 이후로 반복횟수가 점점 증가함에 따라 처짐은 미세하게 증가하는 추세를 보였다. 이와 같이 피로실험에서의 처짐은 반복횟수에 영향보다 작용하중 범위나 응력범위(Stress range, ΔR)에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 반복하중에 대한 처짐곡선을 통하여 최대하중과 최소하중의 진폭에 따른 처짐의 진행대를 뚜렷이 확인할 수 있었고, 본 실험에서 전단보강철근은 처짐 억제에 큰 영향을 미치지 못했다.

3.2.3 반복횟수와 변형률 관계

Fig. 14 및 Fig. 15에서는 반복횟수와 변형률 관계를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 반복하중에 의한 인장철근의 변형률은 재하 초기에 큰 변화를 보이고 반복횟수가 증가할수록 일정한 변동폭으로 아주 조금씩 증가하다가 인장철근의 항복점에 도달했을 때 큰 증가를 나타냈다. 전단보강철근의 변형률은 사인장균열이 발생하는 지점에서 상당히 큰 폭으로 증가하기 시작하였고 이러한 변형률의 증가는 파괴직전까지 계속되었다.

대부분의 부재에서 두 개의 인장철근 변형률은 거의 일치하였으나 2단으로 배치된 철근콘크리트 보의 인장철근에서 하부철근이 항복하더라도 곧바로 인장변형률이 크게 증가하지 않았다. 그리고 반복횟수가 증가함에 따라 하부철근과 상부철근의 변형률 값의 차이가 커짐을 알 수 있었다. 콘크리트에 결함이 있는 한쪽면에 발생한 균열로 인해 그곳에 응력이 집중되어 균열의 폭이 커짐으로서 다른쪽의 변형률보다 크게 나타나는 경향이 보였다.

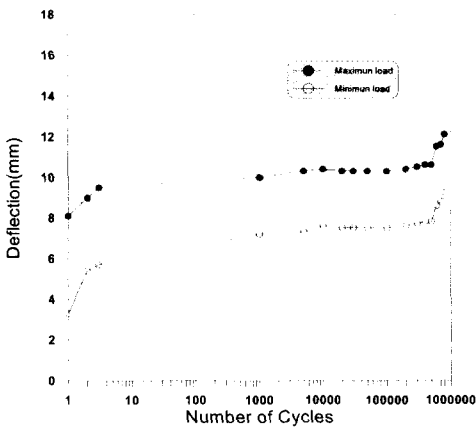


Fig. 12 Number of cycles - deflection relation of HIIBF2

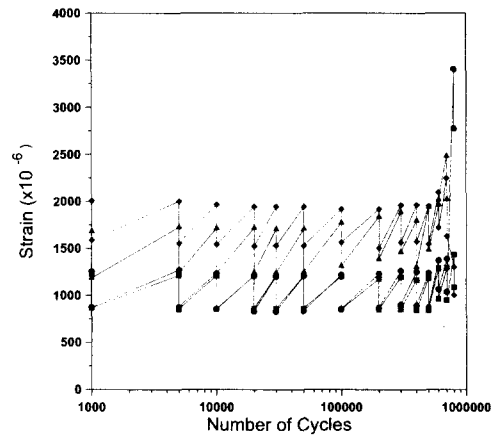


Fig. 14 Number of cycles - longitudinal steel strain relation of HIIBF2

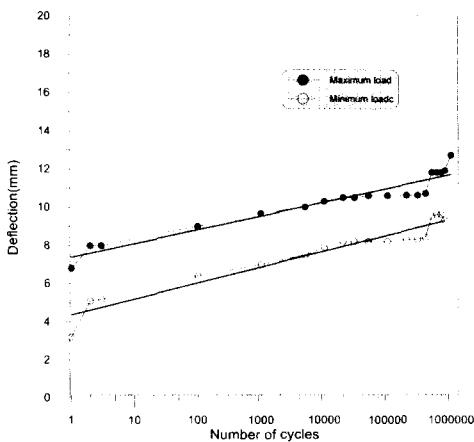


Fig. 13 Number of cycles - deflection relation of HIICF2

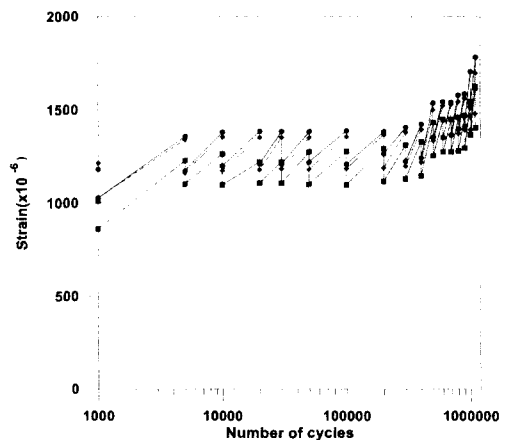


Fig. 15 Number of cycles - stirrup strain relation of HIICF2

Table 5 Results of fatigue test

Name of beams	P_{min} (tf)	P_{max} (tf)	R^*	Min stress (kgf/cm ²)	Max stress (kgf/cm ²)	Stress range (kgf/cm ²)	P_u (tf)	N_u (cycle)	P_{fc} (tf)	P_{cr} (tf)	Failure mode
HIIAF1	2.88	9.6	0.70	4.17	13.91	9.74	13.7	1,100	2.1	13.0	Shear
HIIAF2	2.14	7.14	0.60	2.85	9.52	6.67	11.91	4,260	2.21	9.80	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)
HIIIAF1	1.72	5.74	0.60	2.29	7.65	5.36	9.57	2,793,000	1.96	7.23	Shear
HIIIAF2	2.87	9.55	0.60	4.16	13.84	9.68	15.91	1,496,000	2.05	12.80	Shear

P_{fc} : First flexural cracking load

P_{cr} : First diagonal cracking load

P_u : Static ultimate load to failure

N_u : Number of cycles to failure

P_{min} : Minimum of ultimate static

P_{max} : Maximum of ultimate static

T : Tensile bar breaking

S : Stirrup breaking

ST : Shear-tension failure

R^* : Ratio of ultimate cyclic load and ultimate static load

3.2.4 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상

Fig. 16 및 Fig. 17에서는 고강도 철근콘크리트 보의 반복횟수 증가에 따른 균열성장과 파괴양상을 나타냈다. 전단보강철근이 없는 보 (AF-Series)의 경우에는 정적하중이 작용할 때 휨균열이 발생하고 전단구간내인 재하점과 받침점 사이에서 초기 휨균열이 성장하다가 어느 단계에서 급작스럽게 사인장균열이 형성되고 반복하중을 받으면서 균열의 폭이 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 전단보강철근이 있는 보 (BF-Series, CF-Series)의 경우에는 반복횟수의 증가에 따른 균열성장거동은 초기에는 미세균열이 점차로 성장하여 사인장균열로 발전하게 되었다.

반복하중에 의한 휨균열은 보의 중앙부 하단에 발생하여 그 이후에는 반복횟수가 증가함에 따라 균열이 느린 속도로 사인장균열로 성장하였다. 보의 파괴양상을 크게 두가지로 구분할 수 있으며 전단보강철근이 있는 경우와 없는 경우에 큰 차이점을 보이고 있다. 이러한 파괴는 콘크리트의 압축파괴와 철근의 피로파괴로 구분된다. 본 실험 결과로부터 전단보강철근이 있는 경우 HIIBF1 실험체는 반복횟수 약 112만회에서 인장철근과 전단보강철근이 동시에 피로파단되었고, HIIBF2 실험체는 반복횟수 약 85만회에서 전단보강철근에 의해서 피로파단 되었으며 모두 사인장균열에 의한 사인장파괴 되었다. HIICF1 실험체는 반복횟수 약 321만회 이상의 반복하중을 견디었고 휨균열에 의한 휨파괴 양상을 보였다. HIICF2 실험체는 반복횟수 약 123만회에서 인장철근의 피로파단으로 휨균열에 의한 휨파괴되었다.

HIIIAF1 실험체는 반복횟수 약 279만회에서, HIIIAF2 실험체는 반복횟수 약 1,50만회에서 모두 사인장균열에 의해 사인장파괴 되었다. 또한 HIIAF1, HIIAF2 실험체는 정하중에 의해서 파괴되는 경우로 과도한 하중으로 인하여 철근이 휘어져 부재가 파손되는 양상을 볼 수 있었다.

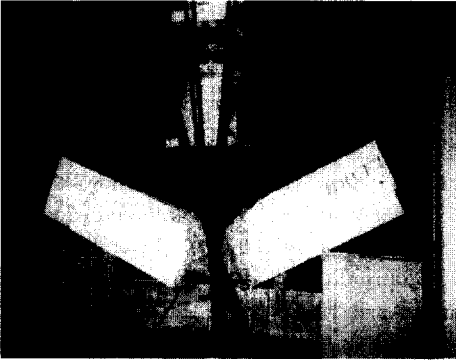


Fig. 16 Flexure fatigue failure feature

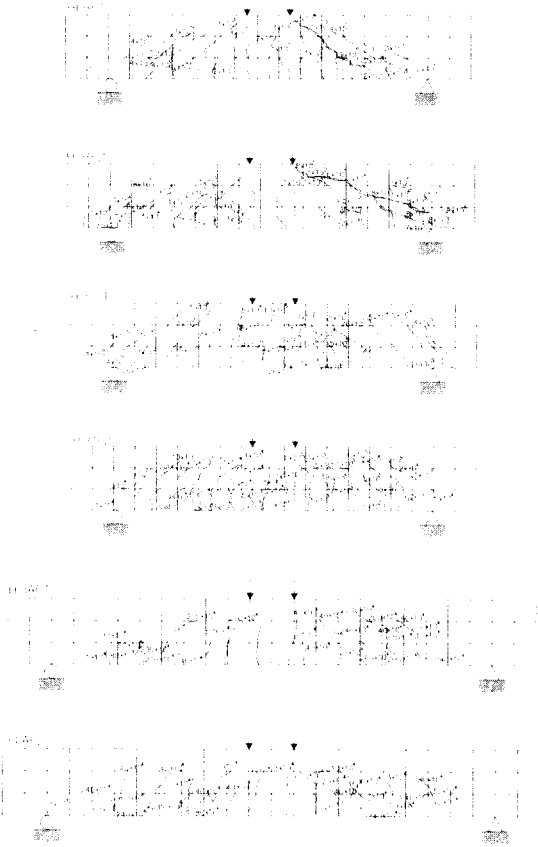


Fig. 17 Crack growth pattern of beams

4. 결론

본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 철근 콘크리트 보에 대하여 기본실험, 정적실험 및 피

로실험을 통하여 고강도 철근콘크리트 보의 전단 피로거동을 규명한 것으로서 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 물결합재비(W/(W+SF)가 18~27% 범위에서 혼화재인 실리카흙 혼입율은 10~15% 정도 혼입한 경우 재령 28일의 압축강도가 800~1,200kgf/cm² 이었다. 고강도 콘크리트의 압축강도에 대한 쪼갠 인장강도비는 1/14.9~1/19.6로 나타내어 고강도 콘크리트의 쪼갠 인장강도는 크게 향상되지 않고 있음을 확인할 수 있었다.
- (2) 전단보강철근이 없는 실험체는 고강도 콘크리트의 취성으로 인해 사인장균열이 발생한 직후 파괴에 이르렀으며 고강도 철근콘크리트 보일수록 파괴양상은 순간적인 취성파괴로 나타났다. 이때의 콘크리트의 파단면은 매끈한 면을 가졌다.
- (3) 고강도 콘크리트 보의 정적실험에 있어서 하중과 처짐 관계는 동일한 하중일 때 전단지간비(a/d)가 클수록 처짐도 증가했고, 하중과 변형률 관계는 동일한 하중에서 고강도일수록 변형률은 작았다.
- (4) 피로하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보에 대하여 전단보강철근이 없는 실험체의 경우에는 휨균열 이후 사인장균열에 의해 급작스럽게 파괴에 이르렀으나, 전단보강철근이 있는 실험체의 경우에는 인장철근 및 전단보강철근의 항복으로 피로파단 되었고, 휨 및 사인장 파괴 양상을 나타내었다.
- (5) 피로실험결과 고강도 철근콘크리트 보는 정적 극한강도의 57~66%에서 파괴되었으며 S-N 곡선으로부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적 극한강도의 60% 전후임을 확인할 수 있었다.
- (6) 피로하중에 의한 고강도 철근콘크리트 보의 안전성 및 사용성 측면에서 반복횟수증가에 따른 처짐 및 변형도의 증가현상을 정확히 분석하므로써 본 연구결과를 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 건설교통부 건설연구개발사업으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

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. ACI ASCE Committee 326, "Shear and Diagonal Tension" ACI Journal, Vol.59, No.1, January, February and March 1962, pp.1~30, pp.277~344, pp.352~396.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318R-95)", American Concrete Institute, 1995.
5. Mphonde, A. G. and Frantz, G. C., Shear Tests of High-and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups, ACI Journal, Vol.81, No.4, pp.350~357, July-August 1984.
6. Elzanaty, A. H. Nilson A. H. and Slate, F. O., Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete Beams, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.290~296, March-April 1986.
7. T. S. Chang and C. E. Kesler, "Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beam", Journal of ACI, Vol.55, August 1958, pp.245~254.
8. 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.
9. 신성우외 5인, "전단-스팬비가 작은 고강도 철근콘크리트 보의 전단성능에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회지, 제4권, 4호, 1992, pp.171~179.
10. 김진근, 박연동, "스터럽이 없는 고강도 철근콘크리트 보의 전단강도특성에 실험적 연구", 한국콘크리트학회지, 제5권, 1호, 1993, pp.103~113.

요 약

최근, 콘크리트 구조물이 점차 대형화, 고층화, 장대화 및 특수화됨에 따라 고강도 콘크리트의 개발 및 콘크리트 구조물에 고강도 콘크리트의 사용이 급속하게 증가하고 있다. 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 얻기 위하여 혼화재인 실리카흄을 사용하였으며, 실험결과로부터 재령 28일의 콘크리트 압축강도는 1.200kgf/cm² 이었다. 정적실험을 통하여 극한하중, 초기 휨균열하중, 초기 사인장균열하중 등을 측정하였고 하중과 철근의 변형을 관계, 하중과 처짐 관계 그리고 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상 등을 관찰하였다. 피로실험을 통하여 반복횟수와 처짐 관계, 반복횟수와 변형을 관계 그리고 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상을 관찰하였다. 피로실험결과 고강도 철근콘크리트 보는 정적 극한강도의 57~66%에서 파괴되었고 S N 곡선으로부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적 극한강도의 60% 전후임을 확인할 수 있었다.

(접수일자 : 1999. 7. 13)