과소철근콘크리트 단순보의 피로거동

Fatigue Behavior of Simply Supported Under reinforced Concrete Beams

변 근 주 * 김 영 진 ** 노 병 철 ** 장 세 창***
Byun, Keun Joo Kim, Young Jin Lho, Byeong Cheol Jang, Sei Chang

ABSTRACT

In recent years, considerable interest has developed in the fatigue strength of reinforced concrete members subjected to cyclic loading for the wide-spread adoption of ultimate strength design procedures, the higher strength materials and the new recognition of the effect of repeated loading on structures such as bridges, concrete pavements and offshore structures.

In this study, a series of experiments is carried out to investigate the fatigue characteristics of deformed bars and underreinforced simply supported beams. The 69 reinforcing bar specimens with grade SD30 and designation of D16, D22, D25, and 24 beam specimens with D16 bars are prepared for this study.

From these series of tests, it is found that i) a decrease of the bar diameter result in increased fatigue life, ii) the fatigue life of the bars embedded as main reinforcement within a concrete is more than that of bars in the air. iii) the fatigue strength at 2 x 10^6 cycles of beams with steel ratio of 0.61% and 1.22% is 64.5% and 63.2% of the yielding strength, respectively.

It is concluded that the low steel ratio has no significant effect on fatigue strength of underreinforced beams and the fatigue life of underreinforced concrete beams can be predicted conservatively by the fatigue life of reinforcing bar.

1장 서론

구조부재의 파괴는 크게 정적파괴와 시간의존성 파괴로 나누어 지는데, 시간의존성 파괴란 시간이 경과함에 따라 구조물의 내부에 서서히 손상이 축적되어 파괴에 이르게 되는 것으로 피로파괴가 대표적인 것이라 할 수 있다.

피로파괴란, 재료가 반복되는 응력 또는 변형을 받아 정적파괴 응력보다 훨씬 낮은 응력에서도 파괴를 일으키는 현상을 말하며, 대부분 급작스런 취성파괴의 양상을 보인다. 실제 구조물의 파괴는 과재하중에 의한 정적파괴보다는 반복되는 하중에 의한 피로파괴가 대부분이며, 이런 경우에는 급격한 파괴를 동반하므로 훨씬 더 큰 위험성을 내포하고 있다.

최근에는 설계개념이 허용응력 설계법에서 극한강도 설계법 및 한계상태설계법으로 변화되고 있으므로 설계시 피로한계상태의 검토가 요구되고, 또한 고강도 콘크리트와 고강도 철근의 사용이 날로 증가되고 있으며, 도로교, 철도교, 해안구조물, 콘크리트포창 및 크레인 구조물등과 같이 열악한 환경조건과 반복하중을 받는 곳에 철근콘크리트의 사용이 증가되고 있기 때문에, 피로파괴에 대한 위험성이 더욱 더 증가되고 있는 실정이다.

따라서, 이들 구조물의 사용수명 동안의 피로에 대한 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 구성재료 및 구조물에 대한 피로특성 및 그 한계를 밝혀 설계 및 해석에 반영해야 한다.

특히 철근콘크리트와 같이 복합재료로 구성된 재료의 피로거동을 파악하기 위해서는 그 구성재료인 콘크리트와 철근의 피로특성을 먼저 구명하므로서 이들 분석자료를 토대로 철근콘크리트 구조물의 피로이론 및 거동특성을 체계적으로 정립하여야 한다.

외국의 경우, 재료의 피로특성을 고려하여 피로해석 및 설계규준에 반영되고 있으며 국내의 경우, 콘크리트의 피로특성에 대해서는 체계적으로 연구되어 왔으나, 철근의 피로특성에 대해서는 아직까지 연구가 미흡한 실정이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 철근 및 철근콘크리트 보의 피로특성을 구명하므로서, 향후 피로설계 개념의 정립에 기초자료로 활용하고자 한다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 준회원, 유신설계공단 철도구조부

2. 철근콘크리트 보의 피로특성

2.1 철근콘크리트 보의 피로기구

철근콘크리트 보에 반복하중이 작용하는 경우, 휨균열 선단에서부터 중립축에 이르는 콘크리트 인장부가 존재하기 때문에 초기 몇 cycle에서는 실제 철근의 응력, 변형율이 균열단면으로 계산한 이론적인 응력, 변형률보다 다소 적은 값을 나타내지만, 반복하중의 재하회수가 증가함에 따라서 인장부의 균열이 점차 증가하므로 피로하중에 의하여 발생하는 철근의 응력,변형율은 균열단면으로 계산한 이론값에 접근하게 된다. 이러한 현상은 하중반복 회수가 증가하여 중립축까지 균열이 발생하면 철근이 인장력을 모두 부담하게 되어 결국은 철근의 피로파괴에 의하여 과소 철근콘크리트 보의 파괴가 결정된다는 것을 나타낸다. 한편, 일본에서 발표된 실험자료에 의하면, 허용응력 이론을 적용할 경우 과대철근보인 경우에는 최대응력수준 50% 이상, 균형철근 보인 경우에는 최대응력수준이 80% 이상인 경우에 모두 콘크리트의 압축피로파괴에 의하여 보의 파괴가 지배되었다. 따라서 철근콘크리트 보의 피로거동은 주철근비가 높을수록, 최대응력 수준이 높을수록 콘크리트의 압축 피로파괴가 발생한다고 할 수 있다. 또한, 철근의 배치현황 및 단면의 기하형상은 부재의 강도에는 큰 영향을 미치지않는 것으로 나타났으며, 철근이 2단배치 되면, 단면의 외측철근이 먼저 피로파단 되기 때문에 직경이 작은 철근의 다단 배치보다는 큰 직경의 철근을 배치하는 것이 유리하다.

철근콘크리트 보가 전단에 의한 피로파괴를 일으키는 경우에는, 전단지간 a와 유효깊이 d의 비(a/d)와 전단철근의 유무에 따라 다른 거동을 보인다. 槍具는 정적 재하에서의 파괴형식이 a/d에 의하여 변화하는 것과 같이, 피로하중 재하시에도 파괴형식은 비슷하지만 그것은 반드시 정적 재하시와 일치하는 것은 아니며, 동일 a/d에서도 최대응력의 크기에 따라 파괴형식이 달라진다고 지적하였으며, 그림 2.1과 같은 전단파괴기구의 개념도를 제안하였다. 그림에서 (a/d)s, (a/d)f는 아치기구에서 산정한 파괴하중 곡선과 사인장균열하중에 대한 정적(N=1) 및 100만회 반복재하에 대한 S-N곡선과의 교점을 나타내는 것으로, 실제 구조물의 a/d가 (a/d)s 와 (a/d)f 사이에 있고, 최대재하 하중이 아치기구의 파괴하중 Pas보다 클 경우, 사인장균열의 발생과 동시에 부재의 파괴가 발생하지만, 최대재하 하중이 Pas보다 작고 사인장 균열하중 Pcf보다 클 경우는 사인장균열 발생 후 아치기구의 피로파괴에 의하여 파괴된다고 하였다.

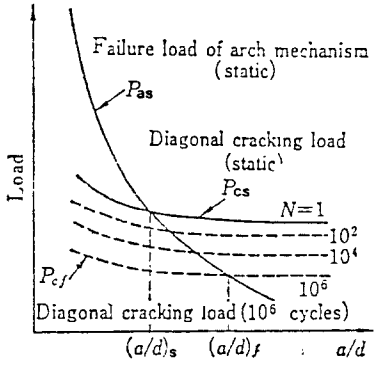

그림 2.1 전단피로 파괴기구

또한 岡村은 전단보강 철근을 갖는 철근콘크리트 보의 피로실험을 통하여 휨 가공된 전단철근의 피로강도는 모재의 피로강도에 비하여 약 50%정도가 됨을 밝힌 바 있다.

2.2 콘크리트의 피로특성

콘크리트의 피로특성은 환경, 골재의 종류, 굵은골재의 최대치수 및 공기량등의 내적인자와 응력비, 반복재하속도,, 휴지시간, 재하파형, 편심 및 측면재하등의 외적인자에 의하여 변화하며 이들 영향인자중에서 본 연구와 관련이 있는 주요 외적영향 인자의 영향을 기술하면 다음과 같다.

2.2.1. 응력비

최소응력과 최대응력의 비인 응력비(R)가 증가하면 피로수명이 증가하고 응력비가 감소하면 피로수명이 감소한다. 1985년 오병환의 무근콘크리트 휨피로 실험결과 제시한 식 (2.1)에서도 유사한 결과를 얻고 있다.

$$fr,max/fr' = 1 - c \log N \qquad (2.1)$$

여기서, fr'은 정적파괴계수, fr,max는 최대피로 휨응력, c = 0.0690(1-R)을 나타낸다.

2.2.2. 반복재하속도

1985년 노병철의 실험에 의하면 최대응력 수준이 80% 이하의 범위내에 있을 때에는 재하진동수 250-800cpm 사이의 반복재하속도의 변화는 피로강도에 큰 영향을 미치지 않고, 80%이상의 고응력수준에서는 재하속도가 느려짐에 따라 피로수명이 약간 감소하는 것으로 나타났다.

2.2.3. 편심

Ople와 Hulsbos는 편심압축 피로실험을 통하

여 그림 2.2에 표시한 것과 같이 편심크기에 따른 S-N곡선을 도출하여 편심이 증가할 수록 콘크리트의 피로강도는 증가하는 것을 확인한 바 있다.

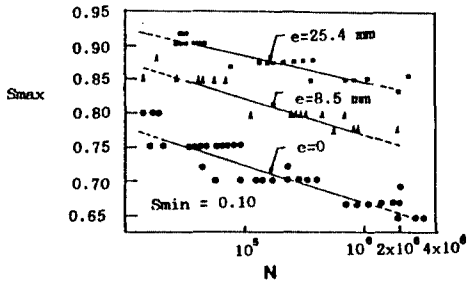

그림 2.2 편심압축응력하의 S-N 상관도

2.3 철근의 피로 파괴특성

피로에 의한 파괴과정은 크게 3가지의 과정으로 나눌 수 있다. 즉, 그림 2.3 에 표시한 것과 같이 대개의 경우 피로균열의 전파과정은 부재표면에 있어서 반복소성 미끄럼에 의하여 인장응력의 방향과 약 45° 방향의 미끄럼면에 따라 형성된 균열이 그 방향으로 전파하는 제1단계(보통 1결정립 정도의 거리), 이것에 이어지는 인장방향에 수직으로 전파하는 제2단계 및 최종적인 정적파괴의 3단계로 구분된다. 이중에서 파면의 주요부분을 이루고 스트라이에이션등 피로의 특징적 모양이 나타나는 것은 통상적으로 제2단계이다.

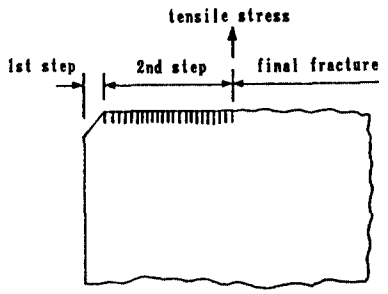

그림 2.3 피로파괴면

피로균열의 발생 및 진전기구에 관해서는 여러 모델이 제안되어 있으며, 가장 일반적인 피로균열 발생기구의 모형은 그림 2.4에 나타나 있는 Wood의 모델이다. 그림에서 보인 바와 같이 하중의 작용으로 응력이 상승하는 동안 재료표면에 존재하는 개재물 등으로 인하여 국부적인 소성 미끄럼이 일어나며, 하중이 감소하는 동안에는 앞에서의 미끄럼을 방해하므로 미끄럼은 평행한 다른면에서 반대방향으로 일어난다. 이와같은 작용의 반복으로 피로균열이 발생하게 된다.

이와같은 현상으로 발생한 피로균열은 반복하중이 증가함에 따라 점차 증가하게 되며, 균열이 임계치 이상 발생하면 파괴에 이르게 된다.

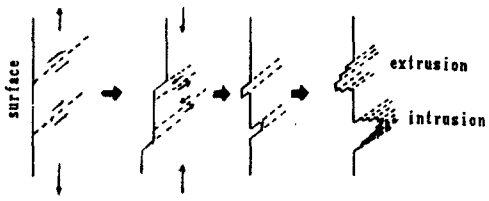

그림 2.4 피로균열 발생모델(Wood's model)

2.4 철근콘크리트보의 피로에 미치는 영향인자

2.4.1. 철근비의 영향

철근콘크리트 보의 파괴는 일차적으로 균형철근비를 기준으로 하여, 철근비가 균형철근비 이상이 되면 콘크리트의 압축파괴를 일으키며, 균형철근비 이하가 되면 철근의 인장파괴가 발생한다. 岡村은 실험을 통하여, 철근비가 1.5%이하 에서는 철근비가 보의 피로강도에 크게 영향을 미치지 않지만, 1.5%이상이 되면 철근비에 따라 보의 피로특성도 달라진다고 보고하였다. 또한 서림, 정상은 허용응력설계법에 의한 균형철근비(2.8%)와 균형철근비의 약 2배(4.9%)를 갖는 보의 피로실험을 통하여 그 파괴양상이 철근비에 따라 달라짐을 밝혔다.

2.4.2. 응력수준

구조물에 작용하는 응력의 크기는 피로수명을 결정하는데 가장 중요한 외적요인이며, S-N곡선상에서 이를 표현하는 방법에는 최대응력, 하중 또는 응력비 및 응력수준등으로 표현하고 있다. 응력수준과 피로수명과의 관계는 크게 유한수명구간(finite-life region)과 장수명구간(long-life region)으로 구분된다.

2.4.3. 최소응력수준

최소응력이 피로수명에 미치는 영향에 대해서는 연구가들 사이에서도 이견이 존재한다. Rehm과 Fisher는 그의 논문에서 최소응력은 피로강도에는 거의 영향을 미치지 않는다고 하였으나, Jhamb, Macgregor, Nutall은 이형철근의 피로실험을 통하여 최소응력이 피로강도에 상당한 영향을 미친다고 주장하였다. Pfister와 Hognestad는 최소응력수준을 항복강도의 10%, 30%로 하여 실험한 결과, 최소응력 수준이 증가하면 피로수명이 약간 감소한다고 하였다.

그러나, Jhamb과 Mcgregor는 최소응력수준을 항복강도의 10%와 40%로 하여 보의 피로실험을 수

행한 결과, 유한수명구간(finite-life region)에서 최소응력의 영향을 발견할 수 없었다고 주장하였다.

2.4.4. 철근의 직경과 변형율 기울기

Forrest는 놋치(notch)가 없는 시편의 경우, 직접인장 피로시험의 경우에는 피로강도에 직경의 영향이 없으나, 가공한 시편의경우는 직경이 1 inch이하에서 직경이 증가함에 따라 피로강도가 감소함을 밝혔다. 또한 Kravshenko는 시편단면의 증가는 휨 또는 비틀림을 받는 경우에 피로균열이 발생할 가능성을 높여준다고 주장 하였으며, Tetelman과 McEvily도 단면중 가장 높은 응력을 받는 부위에서 critical flow가 발생할 가능성과 관련하여 Kravshenko의 주장을 입증하였다. 특히 Hanson과 Halgason은 철근직경이 증가할수록 인장선단에 더 큰 변형율기울기 효과를 유발시켜 피로수명을 감소시킨다고 주장하였다.

Wascheidt, Kokubu and Okamura, Macgregor, Jhamb 및 Nutall등의 실험에서도 직경이 증가함에 따라 피로강도는 감소하는 경향을 보이고 있다.

2.4.5. 강도등급의 영향

Pfister와 Hognestad는 동일한 직경의 Grade 60과 Grade 75인 이형철근의 실험을 통하여 강도등급이 증가하면 피로수명도 증가한다는 것을 밝혔다. 또한 Gronqvist도 직경이 16mm (0.63 in)이고 강도등급이 다른 이형철근을사용하여 유사한 경향을 얻고 있다.

2.4.6. 단면형상의 영향

콘크리트와 철근의 부착을 증가시키고, 균열을 분산시키기 위하여 설치된 이형돌기는 돌기부

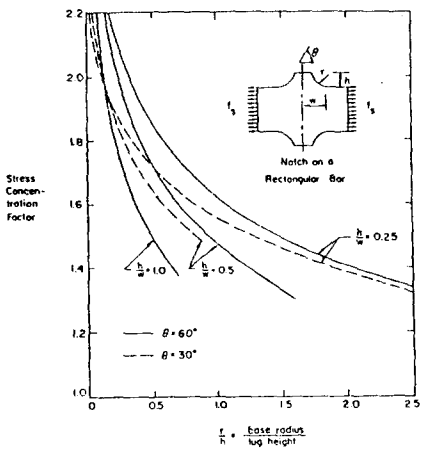

그림 2.5 이형돌기의 응력집중계수

에 응력집중(stress concentration)을 발생시켜 돌기의 형상에 따라 피로강도에 상당한 변화를 가져온다. Derecho와 Munse는 응력집중 효과에 대한 이론적인 연구를 통하여 그림 2.5에 나타낸 바와 같이 이형돌기의 형상에 따라 응력집중 효과가 매우 다름을 보여주었다.

또한, Pfister와 Hognestad는 이형돌기의 형상이 다른 철근의 피로실험을 수행하고 그 결과를 그림 2.6과 같이 도시하여 돌기의 형태에 따라 피로수명이 다르게 나타난다고 주장하였다.

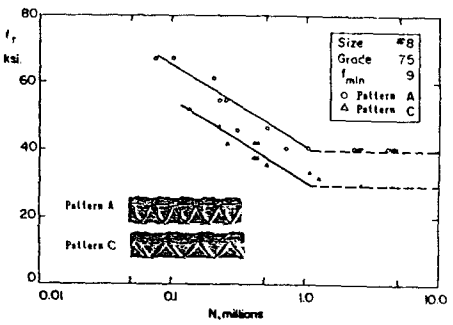

그림 2.6 이형돌기의 영향

3장 보와 철근의 피로실험

3.1. 실험시편제작

3.1.1. 철근시편

국내의 KS규정에는 철근의 피로실험에 관한 별도의 규정이 제시되어 있지 않으므로, 금속재료의 인장시험 방법을 규정한 KS B 0802, 강재의 피로실험에 관한 ASTM E466 및 기초피로실험 결과를 토대로 이형철근의 피로실험을 위한 시편을 그림 3.1에 도시된 바와 같이 아연정착구를 갖는 시편으로 제작하였다. 한편, 아연정착구는 10cm길이로 제작하여 Grip에 충분히 정착될 수 있도록 하였으며, 시편의 총길이는 직경이 D25인 경우는 4.5D + 20cm로, D16 및 D22는 9D + 20cm로 철근직경에 따라 상이하게 제작 하였다.

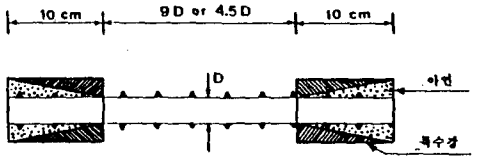

그림 3.1 철근실험시편

3.1.2. 철근콘크리트 보 시편

시편의 제작을 위하여 비중 3.15의 보통포틀랜드 시멘트와 골재번호 #57인 임진강산 골재를 사

용하였으며, 주철근은 강도등급 SD30의 D16 이형 철근을 전단보강 철근은 D10을 사용하였다. 배합표는 표 3.1와 같다.

표 3.1 콘크리트 배합표

설계기준 강도 (kg/cm²)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	W/C 비 (%)	잔골재율 (%)	단위량 (kg/m³)			
					물	시멘트	잔골재	굵은골재
350	25	8±1	34.9	58.7	180	516	626	1066

실험을 위하여 제작된 보의 제원은 표 3.2에 나타내었으며, 단면도는 그림 3.2와 같다. 정적 및 피로실험시의 재하방법은 3등분점 하중법으로서 전단지간내의 전단파괴를 방지하기 위하여 D10의 스터럽을 콘크리트 표준시방서 규정에 따라 7cm의 등간격으로 보 중앙부를 제외한 양쪽 전단지간에 배근하였다.

표 3.2 실험용 보의 제원

철근 직경	콘크리트강도 (kg/cm²)	b (cm)	d (cm)	l (cm)	a (cm)	철근비 (%)
D16	327	20	16.2	170	45	0.61
D16	359	20	16.2	170	45	1.22

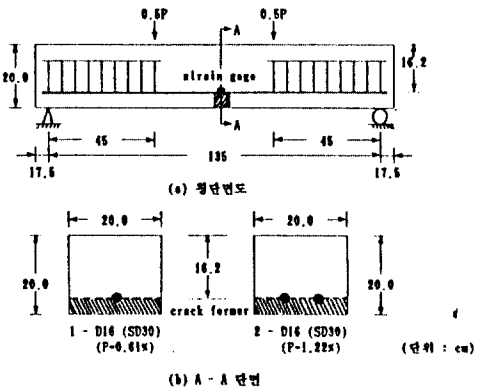

그림 3.2 실험용 보의 단면도

콘크리트를 거푸집에 타설하기전 정적실험용 보의 응력-변형율 관계를 측정하여 보의 항복강도를 구하기 위해 매립형 게이지(KFW-5-CI-11L500)를 보중앙부 주철근에 부착하였으며, 시편의 수는 철근비에 따라 각각 정적강도 시험용으로 3개, 피로시험용으로 9개씩 총 24개를 제작하였고, 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 150mm x 300mm의 표준 원주형공시체를 동일 batch의 콘크리트를 사용하여 제작 하였다.

3.2. 정적실험 및 결과

구성재료의 강도를 구하기 위하여 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 콘크리트 원주형 공시체의 압축강도실험 및 철근의 인장실험을 실시하였으며, 그 결과는 표 3.3 및 표 3.4와 같다. 보의 정적하중 강도를 구하기 위한 하중재하 방법은 3등분점 하중법(four point bending)을 적용하였으며, 하중재하 기기는 Instron모델 1333을 사용하였다. 또한 3등분점 하중을 재하시키기 위하여 실험조건에 맞는 하중재하 장치를 별도 제작하여 사용하였다. 실험중 보 중앙부 압축변형율과 인장변형율을 측정하기 위하여 단계별로 하중증가를 중단하고 Strain Indicator를 이용하여 변형율을 측정하였다.

정적실험으로 측정된 하중-변형율 관계는 그림 3.3 및 3.4와 같다.

표 3.3 콘크리트 압축강도실험 결과(단위:kg/cm²)

구 분	시편번호	1	2	3	평균
BF1	압축강도	317.6	328.2	335.3	327.0
BF2	압축강도	323.3	406.4	347.3	359.0

표 3.4 철근의 인장실험 결과(단위:kg/cm²)

시편번호	1	2	3	평균
인장강도	3189.0	3356.8	3271.9	3272.9

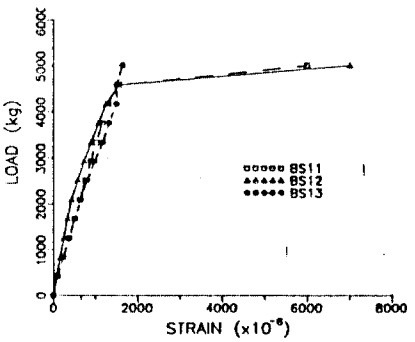

그림 3.3 하중-변형율 관계 (P=0.61%)

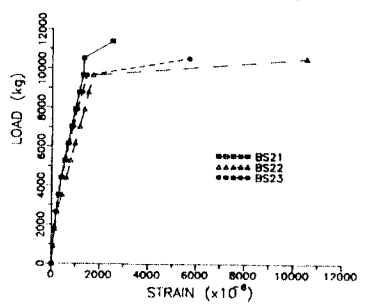

그림 3.4 하중-변형율 관계 (P=1.20%)

3.3. 피로실험 및 결과

3.3.1. 철근의 직접인장 피로실험

철근의 정적인장실험을 통하여 구한 항복강도를 이용하여 피로실험시의 재하하중을 결정하였다. 즉 최대응력 수준은 정적항복강도의 90%, 75%, 65%로 변화시켰으며, 최소응력수준은 10%로 고정하여 실험을 수행하였다.

또한 반복하중 재하속도는 600cpm, 재하파형은 사인파(sine wave)를 사용하였다. 이상과 같은 조건으로 실험을 수행한 결과는 표 3.5와 같으며, 최대응력수준 및 최소응력 수준은 정적인장실험 결과로부터 산정한 값으로서 정적항복강도에 대한 비(재하하중/항복강도)를 나타낸다.

표 3.5 철근의 직접인장피로실험 결과

철근직경	응력수준	피로수명(N)	Log N	비 고
D16	Smax-90%	81,050	4.9088	정적강도
	Smin-10%	151,000	5.1790	6,410 kg
		66,730	4.8178	
		75,170	4.8760	90%-5,849 kg
		139,700	5.1452	75%-4,874 kg
	Smax-75%	403,000	5.6053	65%-4,224 kg
	Smin-10%	325,600	5.5127	10%- 641 kg
		299,300	5.4761	
		205,200	5.3122	
		495,400	5.6950	
	Smax-65%	543,000	5.7348	
	Smin-10%	891,700	5.9502	
		719,600	5.8571	
D22	Smax-90%	70,950	4.8510	정적강도
	Smin-10%	93,500	4.9708	15,350 kg
		71,440	4.8539	
		81,690	4.9122	90%-13815 kg
		72,610	4.8910	75%-11513 kg
	Smax-75%	183,800	5.2643	65%- 9978 kg
	Smin-10%	164,500	5.2162	10%- 1535 kg
		264,300	5.4538	
		169,400	5.2289	
		161,700	5.2087	
	Smax-65%	498,800	5.6979	
	Smin-10%	441,400	5.6448	
		459,200	5.6620	
		418,200	5.6214	
		439,900	5.6434	
D25	Smax-90%	114,500	5.0588	정적강도
	Smin-10%	66,990	4.8260	18,667 kg
		86,440	4.9367	
		87,660	4.9428	90%-16800 kg
		60,620	4.7826	75%-14000 kg
	Smax-75%	163,300	5.2130	65%-12134 kg
	Smin-10%	150,600	5.1778	10%- 1867 kg
		210,000	5.3222	
		147,300	5.1682	
		155,000	5.1903	
	Smax-65%	392,800	5.5942	
	Smin-10%	406,300	5.6088	
		464,500	5.6670	
		394,900	5.5965	
		929,600	5.9682	

3.3.2. 보의 피로실험

정적재하 실험을 통하여 얻어진 항복하중을 이용하여 피로실험 수행에 필요한 반복재하 하중을 구하고, 이 하중을 재하시켜 피로실험을 수행하였다. 반복재하하중의 크기는 최대응력은 항복강도의 90%, 75%, 65%를 사용하였으며, 최소응력은 10%로 하였다. 재하장치 및 재하방법은 정적재하 실험과 동일하며, 반복재하 속도는 250cpm을 사용하였으며, 재하파형은 사인파(sine wave)를 사용하였다. 보의 피로실험 결과는 표 3.6과 같다.

표 3.6 보의 피로실험결과

구분 / 시편번호	재하하중 (%)	피로수명 (N)	Log N	비 고
BF11	90-10	613,610	5.7879	파지하중
BF12	90-10	231,320	5.3642	4595kg
BF13	90-10	616,330	5.7121	재하하중
평균	90-10	459,420	-	90%
				-4135.5kg
BF14	75-10	1,061,670	6.0260	75%
BF15	75-10	869,940	5.9395	-3446.3kg
BF16	75-10	748,650	5.8743	65%
				-2986.8kg
평균	75-10	893,420	-	10%
				-459.5 kg
BF17	65-10	1,391,610	6.1435	
BF18	65-10	2,000,000	-	
BF19	65-10	2,000,000	-	
평균	65-10	-	-	
BF21	90-10	459,990	5.6627	파지하중
BF22	90-10	126,070	5.1006	9652.5kg
BF23	90-10	196,450	5.2933	재하하중
				90%
평균	90-10	260,837	-	-8687.3kg
				75%
BF24	75-10	679,300	5.8321	-7239.4kg
BF25	75-10	540,910	5.7331	65%
DF26	75-10	711,270	5.8520	-6274.1kg
				10%
평균	75-10	643,827	-	- 965.3kg
BF27	65-10	1,136,610	6.0555	
BF28	65-10	2,000,000	-	
BF29	65-10	-	-	
평균	65-10	-	-	

4장 실험결과의 분석

4.1. 실험자료의 분포함수

피로수명(Nf)은 연속적인 확률밀도함수로 표현될 수 있으며, 콘크리트 실험자료의 분석에는 Weibull분포함수를 도입하는 것이 일반적이다.

Weibull분포의 누가확률분포 함수는 식 (4.1)과 같이 표현된다.

$$F_X(x) = 1 - \exp\left\{ -\left(\frac{x}{\Gamma} \right)^{\alpha} \right\} \quad (4.1)$$

Weibull분포함수는 그림 4.1과 같이 형상계수 α에 따라 여러가지의 확률밀도함수를 나타낸다. 즉 α=1 이면 지수분포, α=2 이면 Rayleigh 분포, α=3.57이면 정규분포의 형태를 가지게 된다.

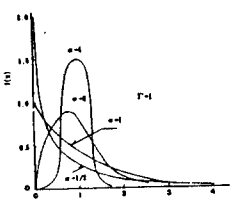

그림 4.1 형상계수 α에 따른 Weibull분포함수

4.2. 회귀분석

표 3.5 의 실험결과를 이용하여 구한, 회귀직선식의 계수 a, b는 표 4.1 및 표 4.2에, 단순회귀분석에 의한 직경에 따른 S-N관계의 비교는 그림 4.2에 나타내었다. 한편, 철근비가 다른 응력수준-피로수명 및 대기중에서의 철근의 직접인장피로실험과 동일직경의 철근으로 철근콘크리트 보를 제작하여 피로실험을 실시한 결과를 비교하면 그림 4.2 및 그림 4.3과 같다.

표 4.1 회귀직선식(직접인장피로실험)

D	a	b	Smax = a + b log N	상관계수
D16	2.145	-0.252	Smax = 2.145 - 0.252 logN	87.62
D22	2.429	-0.315	Smax = 2.429 - 0.315 logN	95.12
D25	2.251	-0.282	Smax = 2.251 - 0.282 logN	85.23

표 4.2 회귀직선식(보의 피로실험)

D	a	b	Smax = a + b log N	상관계수
BF1	2.736	-0.332	Smax = 2.736 - 0.332 logN	79.28
BF2	2.263	-0.257	Smax = 2.263 - 0.257 logN	74.41

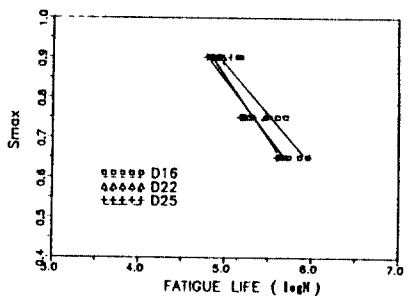

그림 4.2 직경에 따른 S-N 관계의 비교

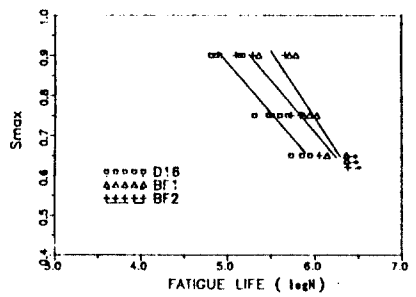

그림 4.3 직접인장 피로실험과 철근콘크리트 S-N 상관도의 비교 (D16)

4.3. 결과분석

제 4 장 2절에서 도출한 응력수준-피로수명 관계를 이용하여, 교량등과 같은 일반적인 토목구조물의 피로설계시 사용하는 2백만회 피로수명에 대응하는 응력수준을 구하면 철근의 경우, D16에서는 항복강도의 55.7%, D22의 경우에는 44.4%, D25는 47%를 얻을 수 있었다. 한편 직경에 따른 피로수명의 변화는 그림 4.2에서 나타난 바와 같이 D25와 D22의 경우에는 큰 차이를 발견할 수 없었으나, D16의 경우에는 이들에 비하여 피로수명이 상당히 크게 나타났다. 이와 같이 D22와 D25에 비하여 D16의 피로수명이 크게 나타난 것은 직경의 차이가 커 다른 영향인자의 영향보다는 직경변화가 피로수명에 미치는 영향이 지배적인 영향인자가 되었기 때문인 것으로 분석되며, D22와 D25의 경우에는 직경의 차이가 크지 않아 다른 영향인자의 영향등으로 직경의 차이가 지배적인 영향인자가 되지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 철근의 직경이 증가하면 피로수명은 감소하는 것으로 분석된다.

한편, 철근비 변화에 따른 과소 철근콘크리트 보의 실험결과에 의하면 낮은 응력수준에서는 철근비가 피로수명에 큰 영향을 미치지 않았으나, 응력수준이 증가 할 수록 철근비 0.61%인 경우가 1.22%인 경우에 비하여 피로수명이 크게 증가하였다. 또한, 그림 4.3에 나타난 바와 같이 철근의 직접인장 피로수명보다 동일철근을 사용한 보의 피로수명이 같은 응력수준에서 더 크게 나타났다. 이것은 직접인장피로를 받는 철근과는 달리 철근콘크리트 보의 경우에는 인장부에 작용되는 인장력은 철근과 콘크리트의 부착으로 인하여 균열이 발생되어 부착기구가 파괴될 때까지 인장력의 일부를 콘크리트가 받게 되기 때문인 것으로 분석된다. 또한 균열이 발생한다 하더라도 균열발생부의 부착은 상실되지만 균열사이의 건전 콘크리트가 인장력의 일부를 여전히 부담하는 잔류강성도효과로 인하여 직접인장 피로수명보다 큰 피로 수명을 갖는 것으로 분석된다.

이상과 같은 결과로부터, 과소 철근콘크리트 보의 피로거동은 사용철근의 피로실험자료를 이용하여 예측 할 경우에는 상당히 안전측으로 평가가 가능한 것으로 분석되었다.

4.4. 타 연구와의 비교분석

피로하중을 받는 과소철근보의 거동에 관한 본 연구의 결과를 검증하기 위하여, NCHRP에서 수행한 실험과 본 연구결과를 비교하면 그림 4.4와 같다.

이들 실험결과는 사용재료, 철근의 성분, 실험조건등이 동일하지 않기 때문에 도출된 S-N곡선을 직접 비교 할 수는 없으나, 피로설계의 중요 영향인자가 되는 피로한계는 본 연구의 경우 64.5%, 와

63.4%.이고, NCHRP의 연구는 53.3%로서 약 16% 정도의 차이를 보이고 있다. 그러나 이 값은 1965년 岡村의 보의 피로한계에 대한 연구결과인 60-80% 범위내의 값으로 그 신뢰성이 인정된다.

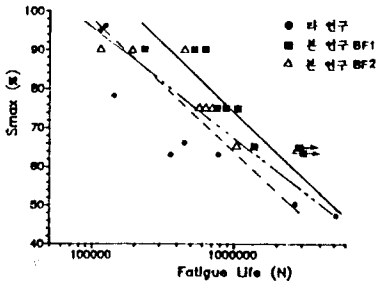

그림 4.4 타 연구와의 S-N 상관관계 비교(I)

5장 결 론

일정진폭의 반복하중을 받는 과소 철근콘크리트 단순보의 피로거동에 관한 실험적 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구는 반복하중을 받는 이형철근 및 과소 철근콘크리트 단순보에 대한 피로실험을 수행한 것으로, 실험결과로 부터 주요영향인자, S-N 곡선, 피로수명의 누가확률분포함수 및 피로한계를 제시 하였으므로 향후 구조물의 피로해석 을 위한 기초자료로의 활용이 가능한 것으로 사료된다.

2. 직접인장 피로시험용 시편형태의 결정에 관한 기초실험결과 아연정착구 시편 이 중앙부 파단이 발생할 뿐만 아니라 grip부의 응력집중과 활동에 대한 저항능력이 우수하므로 철근의 피로실험용 시편의 정착구 형태로 타당한 것으로 평가된다.

3. 직경변화에 따른 피로수명을 분석한 결과 D22와 D25는 큰 차이를 나타내지 않았으나, D16인 경우에는 피로수명이 D22및 D25에 비하여 크게 증가 하였으므로, 철근의 지름이 감소 할 수록 피로수명은 증가하는 것으로 구명되었다.

4. 철근비 변화에 따른 과소 철근콘크리트 보의 실험결과에 의하면 낮은 응력수준에서는 철근비가 피로수명에 큰 영향을 미치지 않았으나, 응력수준이 증가할 수록 철근비 0.61%인 경우가 1.22%인 경우에 비하여 피로수명이 크게 증가하였다.

5. 과소 철근콘크리트 보의 피로실험과 동일 이형철근의 직접인장 피로실험 결과를 비교분석한 결과, SD30, D16의 이형철근인 경우, 200만회 반복재하에 대한 철근의 응력수준이 각각 항복강도의 63.4-64.5% 및 55.7% 이므로 보의 경우가 직접인장인 경우에 비하여 약 15% 정도 크게 나타났다.

6. 과소 철근콘크리트 보의 피로수명은 철근의 피로수명에 의하여 결정될 수 있음을 구명하였고, 이 경우 철근의 피로실험 결과를 사용하여 과소 철근콘크리트 보의 피로수명을 예측 할 경우에는 상당히 안전측으로 평가가 가능한 것으로 사료된다.

6장 참 고 문 헌

1. 岸谷孝一, 西澤紀昭, 疲勞, 技報堂, 1987, pp. 37-88
2. Hanson, J.M. and Ballinger, C.A., "Considera-tions for Design of concrete Structures Subjected to Fatigue Loading," ACI Journal, Vol. 71, No. 3, March, 1974, pp. 97-121.
3. Hanson, J.M., Somes, N.F., Halgason, T h., Corley, W.G. and Hognestad, E., "Fatigue Strength of High Yield Reinforcing Bars," Final Report, National Cooperative Highway Research Program, Project No. 4-7 and 4-7/1, Highway Research Board, Fed. 1975.
4. Ople, F.S. and Hulsbos, C.L., "Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient," ACI Journal, Proceedings, Vol. 63, No. 1, Jan. 1966, pp. 59-82.
5. Jhamb, I.C. and Macgregor, J.G., "Fatigue Strength of Deformed Reinforcing Bars", Structural Engineering Report No. 18, The Uni. of Alberta, 1969, PP. 155-176.
6. Knotte, J.f., Fundamentals of Fracture Mechanics, ISBN, 1979, pp. 234-264.