

철근의 피로특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Fatigue Characteristics of Reinforcing Bars

변근주* 송하원** 노병철*** 양재성****
Byun, Keun-Joo Song, Ha-Won Noh, Byung-Cheol Yang, Jae-Sung

ABSTRACT

Flexural fatigue strength of reinforced concrete members can be controlled by fatigue characteristics of concrete and reinforcing bars because the reinforced concrete members are composite members consisted of the concrete and the reinforcing bars. Since the fatigue characteristics of the reinforcing bars are different from static strength characteristics of those, it is necessary to obtain the fatigue characteristics of reinforcing bars directly from fatigue test.

In this paper, the fatigue characteristics like fatigue strength of reinforcing bars with different diameters and different yield-strengths are obtained experimentally and the analysis and comparison of fatigue test results are presented. For the experiment, most widely used reinforcing bars manufactured by two domestic companies were randomly selected and direct tension fatigue tests were performed.

1. 서론

토목관련 구조물인 교량, 콘크리트포장, 해양구조물, 철도 및 고속철도구조물등은 사용수명동안 적어도 수백만회 정도의 반복하중을 받을 것으로 예상되며, 과재 하중에 의한 파괴위험보다는 계속되는 반복하중에 의한 재료의 누적손상으로 급격한 취성파괴 양상을 보이는 피로파괴 위험이 더욱 심각하다고 할 수 있다.

피로파괴에 대한 관심은 최근들어 구조물이 받는 하중조건이 더욱 열악해짐에 따라 기존 구조물의 사용성, 내구성, 새로운 구조물의 사용수명 동안의 피로에 대한 안전성 설계 및 잔존수명의 평가 등과 관련하여 더욱 고조되고 있다. 따라서 구조물의 피로거동을 이해하고 이에 대한 안전성을 확보하기 위해서는, 먼저 구성재료 각각에 대한 피로특성의 구명이 선행되어야 하며, 더 나아가 이들 재료를 사용한 구조부재 및 구조시스템에 대한 피로특성이

구명되어야 한다.

철근콘크리트부재는 철근과 콘크리트의 복합재료로 구성되었으므로 부재의 휨피로강도는 콘크리트와 철근의 피로특성에 따라 조절될 수 있다.¹⁾

본 논문에서는 철근의 정적 강도특성이 제염향인자에 따라 피로강도 특성과 상이한 점에 착안하여 철근의 피로특성에 큰 영향을 주고 있는 직경, 항복강도 및 용력비를 변화시켜 이에 따른 용력수준-피로수명(S-logN) 곡선 등의 피로특성을 도출하였다.

이를 위하여 국내에서 생산되고 또한 가장 많이 사용되고 있는 2개 회사의 철근을 무작위로 선정하여 직접인장피로실험 실시하였으며, 이에 따른 피로실험결과를 항목별로 비교·분석하였다.

2. 피로 시험

2.1 철근시편의 제작 및 정착방법 개발

본 실험에 사용되는 철근시편은 국내에서 생산된 이형철근으로 제한하였으며, 국내의 4개 철근 제조회사중 생산량이 많은 2개 회사(D사, I사) 제품중 SD30과 SD40을 실험의 대상으로 선정하였다. 각 강도등급별 실험시편의 직경은 KS D 3504에 규정

* : 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수
** : 정회원, 연세대학교 토목공학과 조교수
*** : 정회원, 상지대학교 토목공학과 전임강사
****: 정회원, 한국 고속철도공단

된 규격제품 중 실제 사용빈도 및 피로실험기 Grip의 용량을 고려하여 D16, D22 및 D25의 3종류를 선택하였다.

철근시편에 정착구를 설치하는 방법은 직접정착 방법, 압접 및 용접에 의한 방법, 철판 보강에 의한 방법, 금형에 의한 방법 및 아연 정착구에 의한 방법 등이 있다. 정착구의 형태별 철근시편의 파괴 형태 및 피로수명을 분석하기 위하여 수행된 기초 피로실험 결과에 의하면, 아연정착구에 의한 실험 방법만이 철근시편의 중간부가 파괴되었고, 나머지 방법들은 모두 Grip근처부위가 응력집중을 받아 파단되었음을 알 수 있다. 따라서 가장 바람직한 파괴패괴의 위치가 철근 시편의 중간부임을 고려해 볼 때, 아연정착구에 의한 실험시편의 제작방법이 가장 엄밀한 실험방법인 것으로 평가되며, 본 실험에서도 아연정착구에 의한 실험방법을 채택하였다. 아연정착구는 10cm길이로 제작하여 grip에 충분히 정착될 수 있도록 하였으며, 정적 및 피로 실험을 위한 철근시편의 총 길이는 직경이 D25인 경우는 4.5D+20cm로, D16 및 D22는 9D+20cm로 철근직경에 따라 상이하게 제작하였다(그림 1).

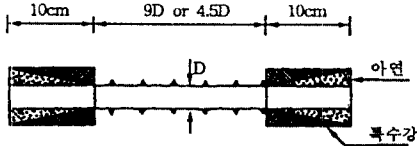


그림 1 아연 정착구 및 철근시편의 제원

2.2 정적실험에 의한 응력-변형률곡선의 도출

철근의 정적 하중-변형률곡선은 작용하중에 대한 변형정도 및 파괴기준 선정의 근거가 되고 있다. 철근은 콘크리트와는 달리 변형을 경화현상을 보이므로 인장강도의 엄밀한 평가를 위해서 실험철근의 강도등급 및 직경의 변화에 따른 응력-변형률곡선을 도출하여 피로실험시의 재하하중을 산정하였다. 정적실험 결과는 표1과 표 2와 같다.

표1 정적인장실험 결과 (D사 철근)

| 구분 | 직 경 | D16(kg/cm ²) | D22(kg/cm ²) | D25(kg/cm ²) |
|----|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 항복 | SD30 | 3272.9 | 3568.8 | 3684.0 |
| 강도 | SD40 | 4140.0 | 4210.0 | 4240.0 |

표2 정적인장실험 결과 (I사 철근)

| 구분 | 직 경 | D16(kg/cm ²) | D22(kg/cm ²) | D25(kg/cm ²) |
|----|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 항복 | SD30 | 3580.3 | 3674.3 | 3443.0 |
| 강도 | SD40 | 4651.0 | 4463.7 | 4407.3 |

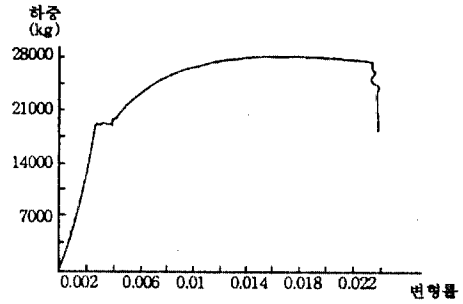


그림 2 응력-변형률곡선 (D사 SD30~D25)

D사 SD30, D25 시편에 대한 정적 응력-변형률 곡선은 그림 2와 같다.

2.3 피로실험의 실시

재하속도는 600cpm, 최소응력은 정적인장강도의 10%, 재하형태는 정현파로 고정시킨 후 최대응력을 정적인장강도의 90%, 75%, 65%의 3가지 경우로 변화시키면서 피로실험을 수행하여 S-N곡선을 도출하였다. 본 연구에서 최대응력수준과 그에 대응하는 피로수명과 함수적인 관련성 규명에 단순 선형 회귀모형(Simple linear regression model)을 적용하였고, 이러한 단순회귀모형의 추정에는 최소 제곱법을 이용하였다.

표 3은 D사 SD30철근에 대한 실험 결과를 이용하여 구한, 회귀직선식의 계수 a, b를 나타내었으며, 직경에 따른 S-N관계의 비교를 위하여 그림 3에 조합하여 나타내었다.

표3 회귀직선식(D사 SD30철근)

| D | a | b | $S_{max} = a + b \ln N$ |
|-----|-------|--------|---------------------------------|
| D16 | 2.45 | -0.252 | $S_{max} = 2.215 - 0.252 \ln N$ |
| D22 | 2.429 | -0.315 | $S_{max} = 2.429 - 0.315 \ln N$ |
| D25 | 2.251 | -0.282 | $S_{max} = 2.215 - 0.282 \ln N$ |

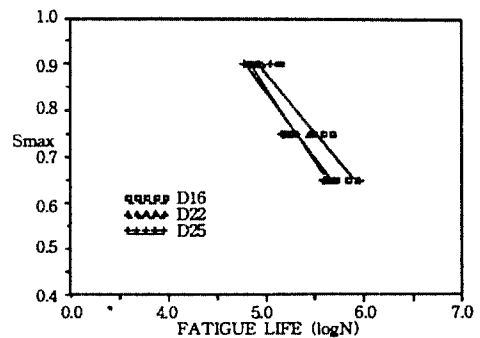


그림 3 직경에 따른 S-N 관계의 비교(D사 SD30)

실험결과로부터 피로수명 2백만회에 대한 피로한계를 구하면, D사 SD30철근의 경우, D16에서는 항복강도의 55.7%, D22의 경우에는 44.4%, D25는 47%로 나타났다. 직경이 증가함에 따라 피로강도가 감소하고 있음을 보여준다.

D사 SD40의 D16, D22, D25 철근에 대한 S-N 상관도는 그림 4에 직경의 변화에 따른 피로실험결과의 비교를 위하여 나타내었다. D22의 경우에는 D25의 경우보다 다소 피로수명이 크게 나타났고, D16의 경우 용력수준 80%이하에서 타 직경보다 피로수명이 큰 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 철근의 직경이 증가하면 피로수명은 감소하는 경향을 나타내는 것으로 분석된다.

그림 5는 철근의 직경을 D25로 고정하고, 강도등급을 SD30과 SD40으로 변화시킨 경우에 대한 강도등급별 실험결과와 외국실험²⁾을 비교·도시한 것으로, 강도등급이 증가할 수록 피로수명이 증가하는 외국실험결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

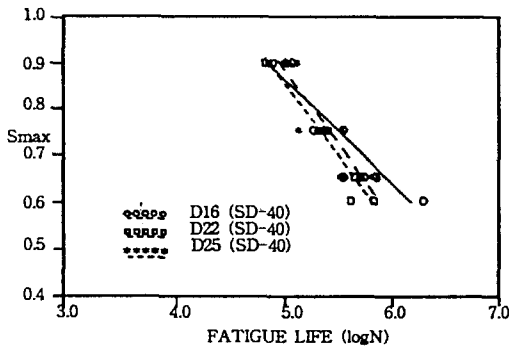


그림 4 직경별 용력수준-피로수명 상관(D사 SD40)

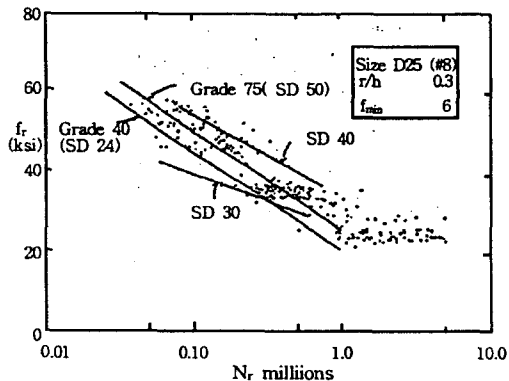


그림 5 외국실험결과와 강도등급별 비교(D사 D25) I사의 강도등급 SD 30철근의 직경에 따른 피로수명 상관은 그림 6에서 볼 수 있듯이 D25철근이 용력수준이 작아질수록 타 직경보다 피로수명이 크게 증가하는 경향을 보였고, 또한 그림 7에서 보이는

것처럼 강도등급 SD40의 경우에 있어서는 직경에 따른 피로수명의 차이가 매우 적었으나 용력수준 80%이하에서 D16이 D22와 D25에 비하여 조금 큰 경향을 보였다. 한편, 그림 8은 I사의 D25철근에 대해 강도등급의 변화에 따른 피로수명을 비교·도시하였는데 강도등급 SD30철근이 SD40철근보다 피로수명이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

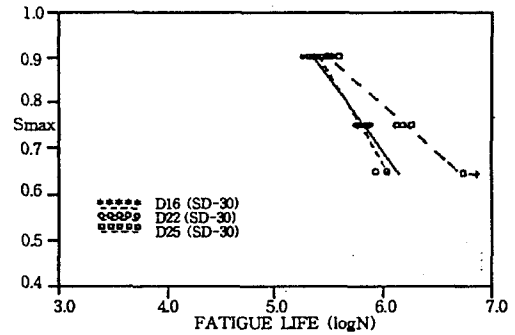


그림6 직경별 용력수준-피로수명 상관도(I사 SD30)

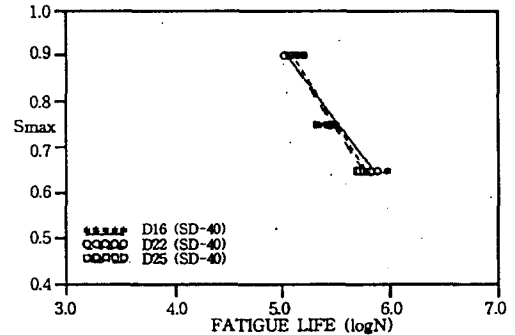


그림7 직경별 용력수준-피로수명 상관도(I사 SD40)

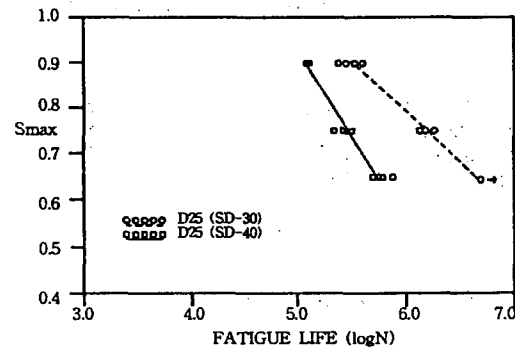


그림8 강도등급에 따른 비교(I사 D25)

3. 철근의 피로기준의 제안

그림 9와 그림 10은 강도 등급별 철근 제조회사별 피로수명의 비교를 나타낸 것으로 대체로 I사 철근이 D사 철근보다 피로수명이 더 큰 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 직경에 따른 피로수명은 I사

SD30철근을 제외한 다른 철근들은 D16의 경우가 D22와 D25의 경우보다 피로수명이 약간 증가하여, 직경이 감소할수록 피로수명이 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 그러나 강도에 따른 피로수명은 D사 철근의 경우 강도등급이 커질수록 피로수명이 증가하는데 반해 I사 철근의 경우는 강도등급이 낮을수록 피로수명이 증가하는 반대의 결과를 나타내었다.

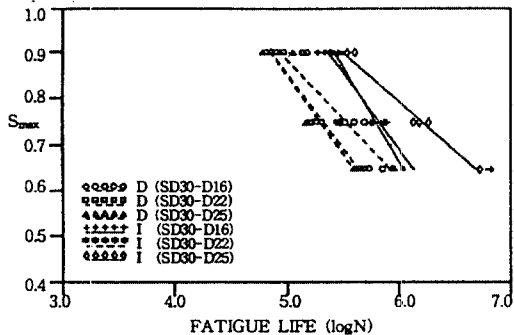


그림 9 SD30에 대한 제조회사별 S-N상관도

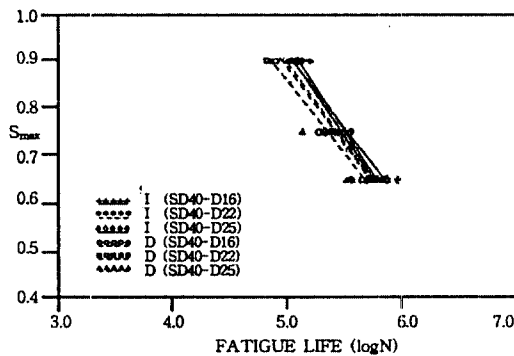


그림 10. SD40에 대한 제조회사별 S-N상관도

이상의 비교결과 I사 철근 피로강도는 D사 철근보다 큰 경향을 나타내므로 D사 철근을 기준으로 본 논문에서는 피로기준을 제시한다. 도출된 S-N상관관계로부터 구한 응력진폭-피로수명관계식은 표 4와 같다.

표 4 응력진폭-피로수명 관계식

| 직경 | SD30 | SD40 |
|-----|--|---|
| D16 | $\Delta \sigma = 6689.81 - 824.77 \log N$ | $\Delta \sigma = 10329.34 - 1402.34 \log N$ |
| D22 | $\Delta \sigma = 8358.13 - 1134.88 \log N$ | $\Delta \sigma = 9720.89 - 1300.89 \log N$ |
| D25 | $\Delta \sigma = 7924.78 - 1038.89 \log N$ | $\Delta \sigma = 10345.60 - 1394.96 \log N$ |

이상의 식들은 강도등급에 대하여 통일된 식을 제시하기 위하여 평균을 취하였는데, 그 식과 반복하중 2,000,000회에 대하여 응력진폭은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{SD30} : \Delta \sigma &= 7,657.4 - 999.5 \log N, \\ \Delta \sigma &= 1,359 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SD40} : \Delta \sigma &= 10,132.0 - 1,366.1 \log N, \\ \Delta \sigma &= 1,524 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

4. 비교 분석

실제 콘크리트 구조물에서의 피로거동특성은 콘크리트, 철근 및 이들의 합성작용에 의한 구조물의 거동에 따라 달라지므로, 구조물의 구성요소인 콘크리트, 철근에 대한 피로특성의 구명은 반드시 선행하여 연구되어야 할 과제이다. 본 연구에서는 철근에 대한 피로실험을 실시하여 피로특성을 제시하는데 목적을 두었다.

이를 위하여 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 2개 회사의 철근(SD30,SD40; D16, D22, D25)을 무작위로 선정하여 직접인장피로실험 실시하였으며, 이에 따른 피로실험결과를 항목별로 비교·분석은 다음과 같다.

4.1 엄밀한 피로실험을 위한 정착구의 개발

Grip부분의 응력집중을 최소화시키고 피로강도를 엄밀히 평가하기 위하여 철근시편에 정착구를 부착하여 실험시편을 제작하였다. 철근시편에 정착구를 설치하는 방법은 직접정착방법, 압접 및 용접에 의한 방법, 철판 보강에 의한 방법, 금형에 의한 방법 및 아연 정착구에 의한 방법 등이 있으나, 가장 바람직한 피로파괴의 위치가 철근 시편의 중간 부임을 고려해 볼 때, 아연정착구에 의한 실험시편의 제작방법이 가장 엄밀한 실험방법인 것으로 평가되며, 향후 PC strand에 대한 피로실험시 까지 확대 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

4.2 강도등급(SD30 및 SD40)에 따른 피로실험

강도등급에 따른 피로수명은 철근생산회사별로 상이한 결과가 도출되었으나 강도등급이 증가할수록 피로강도가 일반적으로 증가하였으며, 외국의 실험결과와도 유사한 것이다.

4.3 철근직경(D16, D22, D25)에 따른 피로실험

강도등급 SD 30의 직경에 따른 피로수명에 대한 영향은 D22와 D25의 경우 큰 차이가 없었으나 직

경이 작아질수록 피로수명이 크게 증가하는 경향을 보였고, 강도등급 SD40의 경우에 있어서는 직경에 따른 피로수명의 차이가 매우 적었으나 일반적으로 직경이 감소할 수록 피로강도가 증가됨을 알 수 있었다. 한편 실제 구조물은 여러가닥의 철근이 다단으로 구성되어 있으므로 일부 외부철근의 파피로 인하여 순간적인 파피는 발생하지 않으나 처짐과 균열등이 점진적으로 증가하여 사용성이 저하되므로 보수 또는 보강이 필요하게 된다. 공용기간내의 이에 대한 예측은 피로설계시 반드시 고려하여야 하는 사항이므로 철근의 배근은 작은직경의 철근을 사용하는 것이 유리하다. 그러나 다단배근에 의한 외측부 철근의 피로 파피로 인한 부재의 피로강도 감소효과에 대한 주의가 필요하다.

4.4 제작회사에 따른 철근의 피로실험

직경에 따른 피로수명은 I사 SD30철근을 제외한 다른 철근들은 D16의 경우가 D22와 D25의 경우보다 피로수명이 약간 증가하여, 직경이 감소할수록 피로수명이 증가하는 일반적인 경향을 보였으며 동일조건인 피로실험시 D사 철근에 비하여 전반적으로 피로수명이 큰 경향을 나타내었다. 그러나 강도에 따른 피로수명은 D사 철근의 경우 강도등급이 커질수록 피로수명이 증가하는데 반해 I사 철근의 경우는 강도등급이 낮을수록 피로수명이 증가하는 반대의 결과를 나타내었다. 비록 I사 철근이 D사철근보다 피로강도는 크지만 강도에 따른 품질관리의 일관성은 부족한 것으로 판단되며, 고강도철근의 피로에 대한 품질항상이 요구된다.

4.5. 철근의 피로 기준의 제안

강도등급에 따른 반복하중 2,000,000회에 대한 용력수준은 다음과 같다.

$$SD30 : \sigma = 1,359\text{kg/cm}^2$$

$$SD40 : \sigma = 1,524\text{kg/cm}^2$$

SD30철근의 경우 미국이나 일본의 피로강도는 1,400~1,600kg/cm²로서 국산철근의 피로강도가 85~97%정도 수준에 있음을 알 수 있으며, SD40철근의 경우도 일본의 1,800kg/cm²에 비하여 약 85%수준에 있는 것으로 평가되었다. 이는 미국의 규정³⁾에 비하여 큰 차이가 없으나 일본 콘크리트 표준시방서의 규정⁴⁾에는 크게 못 미치는 결과로 판단된다. 따라서 고강도철근 일수록 설계시 많은 주의가 필요하다.

5. 결 론

철근의 피로특성에 관한 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Grip부분의 용력집중을 최소화시키고 피로강도를 엄밀히 평가하기 위하여 철근시편에 아연 정착구를 부착하여 철근의 피로특성을 정확히 판단할 수 있었다.
2. 철근의 피로강도는 강도등급이 증가할수록, 철근직경이 감소할 수록 증가함을 알 수 있었다.
3. 강도등급에 따른 반복하중 2,000,000회에 대한 용력수준은 외국의 경우에 비하여 낮아져야 할 것으로 판단되며, SD30의 경우 $\sigma = 1,300 \text{ kg/cm}^2$ 이하로, SD40의 경우는 $\sigma = 1,500 \text{ kg/cm}^2$ 이하가 바람직한 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

1. 변근주, 장세창, "철근 콘크리트 휨부재의 피로 특성에 관한 실험적 연구", 연세대학교 산업 기술연구소 논문집, Vol. 23., 1991.
2. Gronquist, N. O., "Fatigue strength of Reinforcing Bars", Second International Symposium, ACI Publication SP-26 ACI, 1971, pp. 1011-1059.
3. ACI Committee 215 "Consideration for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", ACI Journal, No. 71-10, 1974, pp. 97-121.
4. 日本土木學會, コンクリート標準示方書, 1986.