



축방향철근의 저주파 피로 거동

이재훈¹⁾ · 고성현^{2)*}

¹⁾영남대학교 건설시스템공학과 ²⁾제주산업정보대학 토목과

Low Cycle Fatigue Behavior of Longitudinal Reinforcement

Jae-Hoon Lee¹⁾ and Seong-Hyun Ko^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Jeju College of Technology, Jeju 690-714, Korea

ABSTRACT The purposes of this study is to verify the fracture characteristic of steel which is manufactured in Korea, subjected to cyclic loading. This investigation deals with the low cycle fatigue behavior of longitudinal reinforcement in reinforced concrete bridge substructure (piles and columns of piers). Eighty-one specimens of longitudinal reinforcement were tested under axial strain controlled reversed cyclic tests with strain amplitudes. The selected test variables are ratio of tension strain to compression strain, yield stress of longitudinal reinforcement, ratio of diameter of longitudinal steel to clear length of longitudinal steel, size of longitudinal steel and strain amplitudes. Low cycle fatigue behavior and low-cycle fatigue life are investigated and discussed in this paper.

Keywords : low cycle fatigue, fracture, fatigue, strain amplitude

1. 서 론

형상비가 3이상인 철근콘크리트 교각들의 파괴유형은 일반적으로 피복콘크리트의 박리(spalling)을 시작으로 심부콘크리트의 파괴, 횡철근의 파단과 저주파 피로(low cycle fatigue)에 의한 축방향철근의 파단 등의 파괴유형 중 축력비, 횡방향철근량과 축방향철근량 및 콘크리트 강도에 따라서 하나 또는 둘 이상의 원인에 의해서 파괴된다. 이는 국외(Jaradat 등,¹⁾ Xiao 등²⁾) 및 국내(이재훈 등,³⁾ 정영수 등,⁴⁾ 이대형 등⁵⁾)에서 수행된 실험적 결과에서도 입증되고 있다. 또한, 축방향철근의 저주파 피로와 관련된 해석적 연구가 신현목 등⁶⁾에 의해 진행되고 있다.

심부콘크리트의 파괴와 횡방향 철근의 파단으로 인한 파괴유형은 횡방향철근량을 증가시킴으로써 파괴를 지연시키거나 방지할 수 있으나 반복하중이 재하되는 상태에서 저주파 피로에 의한 축방향철근의 파단은 방지될 수 없다고 Dutta 등⁷⁾은 보고하였다.

Mander 등⁸⁾에 의해 국외의 철근에 대한 저주파 피로 모델이 제안된 이후 국내·외에서 널리 사용되고 있으나 국내에서 생산되는 철근에 대한 검증이 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 국내 현장에서 사용되는 철근의

재료적 특성이 파악되어야 하고, 특히 저주파 피로 특성에 대한 연구가 절실히 필요한 시점이다. 이 연구에서는 실험을 통하여 국내산 축방향철근에 대한 저주파 피로 특성을 파악하고자 한다.

2. 축방향철근의 저주파 피로 실험변수

2.1 저주파 피로 실험변수 결정을 위한 비선형 해석

기둥부재 내에 위치한 축방향철근은 반복되는 횡하중의 영향으로 Fig. 1과 같이 하중방향에 따라서 압축과 인장을 번갈아 받게 된다. 이와 같은 축방향철근의 변형률 거동에서 인장과 압축 변형률의 비율을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 재료비선형 모멘트-곡률 해석을 수행하였다. 비구속 및 구속 콘크리트 모델로 Mander 등⁹⁾이 제안한 모델을 적용하였으며 축방향철근 모델도 Mander 등⁹⁾이 제안한 모델을 적용하였다. 축방향철근의 압축 응력-변형률 모델도 인장 응력-변형률 모델과 동일하게 적용하였다.

해석 변수는 Table 1에 나타난 바와 같이 원형단면의 직경 2,000 mm에 대하여 축방향철근비 ρ_l 은 0.01과 0.02, 축방향철근 및 횡방향철근 항복강도는 300 MPa과 400 MPa, 콘크리트 강도 f_{cu} 는 20, 30과 40 MPa, 축력비 P/P_0 는 0.1과 0.2로 결정하여 재료비선형 해석을 수행하였다. 인장 변형률과 압축변형률의 비율 γ_c 는 Fig. 1(a)와 같은 방향

*Corresponding author E-mail : kosh@jeju.ac.kr

Received November 25, 2009, Revised January 31, 2010,

Accepted February 16, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

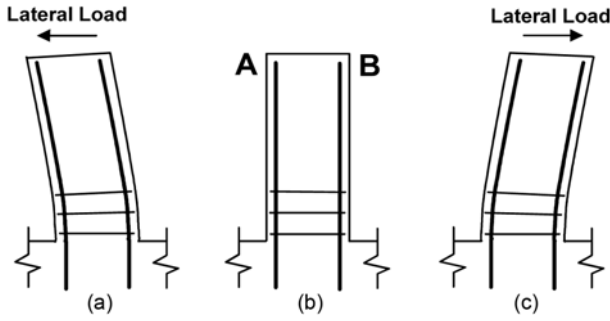


Fig. 1 Behavior of strain for longitudinal steel according to direction of lateral load

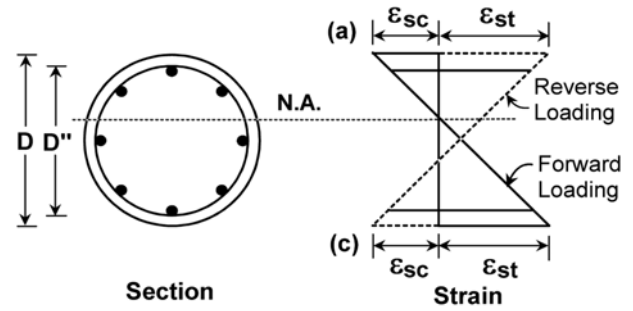


Fig. 3 Distribution of strain for longitudinal steel according to direction of lateral load

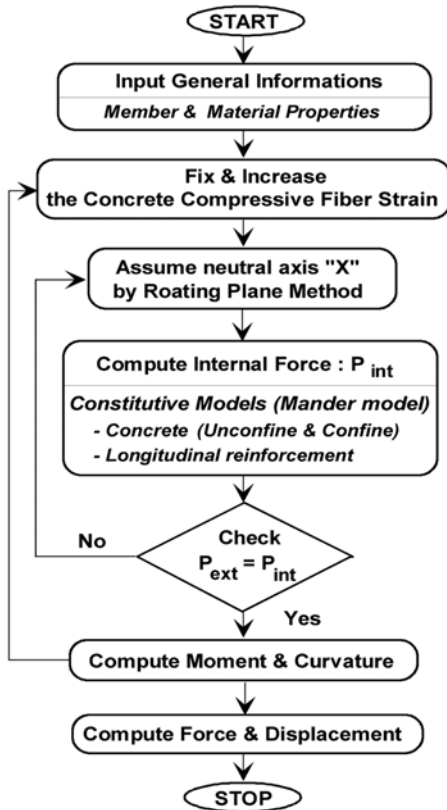


Fig. 2 Flow chart

Table 1 Variables of moment-curvature analysis

| | |
|------------------------|------------|
| D (mm) | 2,000 |
| ρ_l | 0.01, 0.02 |
| f_y & f_{yh} (MPa) | 300, 400 |
| f_{cu} (MPa) | 20, 30, 40 |
| P/P _o | 0.1, 0.2 |

으로 횡하중이 재하된 경우, Fig. 3(a)에 나타난 forward loading 변형률 상태와 같이 단면에서의 축방향철근 변형률 분포에서 인장을 받는 최외측 축방향철근의 변형률과 압축연단에 가장 가까운 거리에 위치한 축방향철근 변형률의 비로써 나타낼 수 있다. 또한 Fig. 1(b)와 같이 횡하중이 제거되어 변형률이 영인 상태를 거쳐서 Fig. 1(c)와 같은 방향으로 횡하중이 재하된 경우, Fig. 3(c)와

같이 단면에서의 동일한 축방향철근은 횡하중 방향이 바뀌게 됨에 따라 압축응력을 받던 상태에서 인장응력을 받는 상태로 바뀌게 되고, 인장응력을 받던 축방향철근은 압축응력 상태로 바뀌게 된다. 따라서 부재내에서 축방향철근은 횡하중이 반복됨에 따라 인장과 압축을 번갈아 받게 된다. 저주파 피로 실험 변수를 결정하기 위하여 비선형해석을 수행하여 얻은 인장변형률과 압축변형률의 비율 γ_{tc} 를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Results of moment-curvature analysis

| ρ_l | f_{cu} (MPa) | f_y & f_{yh} (MPa) | P/P _o | γ_{tc} |
|----------|----------------|------------------------|------------------|---------------|
| 0.01 | 20 | 300 | 0.1 | 3.767 |
| | | | 0.2 | 2.595 |
| | | 400 | 0.1 | 3.419 |
| | | | 0.2 | 2.229 |
| | 30 | 300 | 0.1 | 4.165 |
| | | | 0.2 | 2.760 |
| | | 400 | 0.1 | 3.914 |
| | | | 0.2 | 2.542 |
| | 40 | 300 | 0.1 | 4.500 |
| | | | 0.2 | 2.908 |
| | | 400 | 0.1 | 4.264 |
| | | | 0.2 | 2.709 |
| 0.02 | 20 | 300 | 0.1 | 2.818 |
| | | | 0.2 | 2.053 |
| | | 400 | 0.1 | 2.378 |
| | | | 0.2 | 1.591 |
| | 30 | 300 | 0.1 | 3.292 |
| | | | 0.2 | 2.325 |
| | | 400 | 0.1 | 2.974 |
| | | | 0.2 | 1.794 |
| | 40 | 300 | 0.1 | 3.587 |
| | | | 0.2 | 2.459 |
| | | 400 | 0.1 | 3.337 |
| | | | 0.2 | 2.119 |

2.2 축방향철근의 저주파 피로 실험변수

Table 2에 나타난 바와 같이 인장 변형률과 압축 변형률 비율(γ_c)의 범위는 1.591~4.5이며 평균 값은 약 3:1의 비율을 나타내었다. 재료비선형 해석 결과를 기초로 인장 변형률과 압축 변형률의 비율을 3:1로 결정하여 Table 3과 같이 실험변수를 결정하였다. 인장 변형률을 양수(+)로 규정하여 SR(strain ratio)은 인장 변형률에 대한 압축 변형률의 비율로 계산되며 인장 변형률과 압축 변형률의 비율이 3:1이면 $SR = -3$ 이고, 동일한 인장 변형률과 압축 변형률이면 $SR = -1$ 이 된다. s/d_{bl} 은 횡방향철근 수직간격과 축방향철근 직경의 비율을 나타낸다. 항복강도의 경우 생산된 제품의 규격이다. n 은 철근의 항복강도 규격을 기준으로 한 항복변형률의 배수를 의미한다. 실험시 변형률 $n\epsilon_y$ 를 SR에 따라 인장 변형률과 압축 변형률로 변형률 비율에 따라 나누어지게 된다.

철근콘크리트 부재 내부에 위치한 철근응력은 균열발생과 콘크리트와의 부착효과로 인하여 철근만의 실험에서 예측된 응력-변형률 관계의 항복강도보다 낮은 응력 단계에서 항복이 발생되고, 철근만의 응력-변형률 관계와는 차이를 보이는 비탄성 항복구간과 항복고원 구간을 나타낸다. 이에 대한 연구가 신현목,¹⁰⁾ Hsu,¹¹⁾ Maekawa 등¹²⁾에 의해 진행되고 있다. 철근콘크리트 부재 내부에 위치한 축방향철근의 실제적인 인장·압축 반복변형의 계측은 계측장치 및 계측방법에 있어서 측정이 현실적으로 매우 어렵기 때문에, 그 대안으로 Mander 등⁹⁾은 철근에 대한 실험을 수행하였으며 이 연구에서도 재료단위에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 저주파 피로 실험의 경우 SD300, SD400과 SD500 철근에 대하여 D16, D19와 D22 철근으로 결정하였다.

3. 실험장치 및 실험 방법

축방향철근 및 횡방향철근에 대한 실험은 Fig. 4에 나타난 바와 같은 실험장치를 제작하여 500 kN 용량의 유압가력기(actuator)를 사용하여 수행하였다.

철근을 실험장치에 고정하기 위하여 Fig. 5(a), (b)와 같이 철근 양단을 상온에서 스웨이징 가공법을 이용하여 약 2,000 kN의 압력으로 성형한 후 둥근 삼각전조나사의

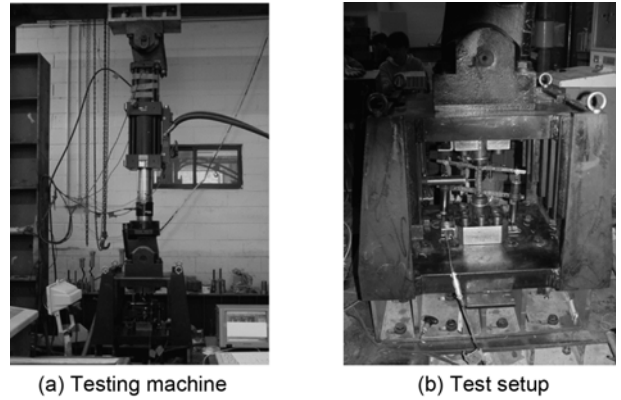


Fig. 4 Photograph of test setup

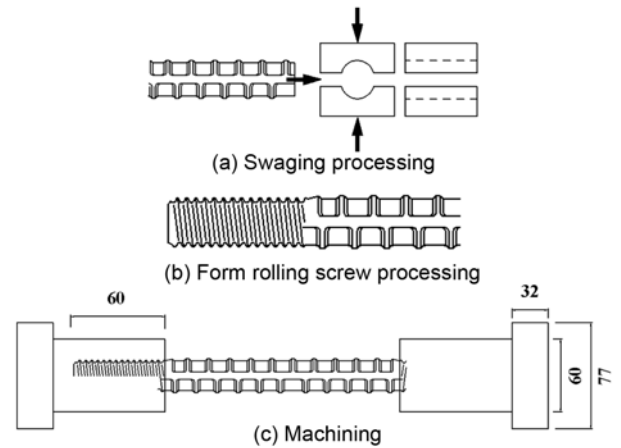


Fig. 5 Specimen fabrication procedure

형태로 가공하였다. 철근과 결합시킬 고정부를 제작하여 커플러 형태의 결합 방법을 적용하였다. 철근의 고정부도 반복하중의 영향으로 슬립 및 마모를 지연시키기 위하여 열처리하여 사용하였다.

Fig. 5(c)는 가공된 철근과 철근 양단에 고정부를 결합한 모형을 나타내고 있다. 철근에 전조나사의 형태로 가공된 길이는 60 mm이고 고정부의 나사 가공된 길이도 60 mm이다. 따라서 철근에 인장력이 작용하는 경우에 철근과 고정부의 나사선들에서 지지하게 되고 철근에 압축 응력이 작용하는 경우에 나사선과 나사선 뒤쪽의 강제 부분이 지지하게 되도록 설계되었다. 변형률의 계측은 CSP-50 변위계 2개를 사용하였으며 수직변위를 계측하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 철근에 고정하였다.

4. 축방향철근의 저주파 피로 실험 결과

4.1 저주파 피로에 의한 반복횟수의 정의

Rao 등¹³⁾은 저주파 피로에 의한 파괴의 기준을 다음과 같이 제안하였다. 첫째로 실험체 길이 내에서 어떤 지점이 두 개의 부분으로 완전히 분리되는 반복횟수, 둘째는 미리 정의된 비율만큼 최대 압축응력에 대하여 압축응력이 감소하는 반복횟수, 셋째는 미리 정의된 비율만큼 최

Table 3 Variable of low-cycle fatigue test

| Class | SR* | s/d_{bl} | Bar diameter (mm) | f_y (MPa) | n |
|-----------|-----|------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------|
| GROUP I | -3 | 6 | 15.9(D16), 19.1(D19), 22.2(D22) | 300, 400, 500 | 10, 20, 35, 50, 65 |
| GROUP II | -1 | 6 | | | 20, 35, 65 |
| GROUP III | -3 | 8 | | | 20 |
| GROUP IV | -3 | 10 | | | |

$$*S.R. = \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{min}} = \frac{tension\ strain}{compression\ strain}$$

대 압축응력에 대하여 인장응력이 감소하는 반복횟수, 넷째는 미리 정의된 비율만큼 최대 인장응력에 대하여 인장응력이 감소하는 반복횟수 등을 저주파 피로에 의한 파괴로 정의하였다. 이 연구에서는 저주파 피로에 의한 파괴(반복횟수)의 정의는 철근 실험체의 길이 내에서 균열이 발생된 후 두 개의 부분으로 완전히 파단(fracture)되는 횟수를 반복횟수로 정의하였다. Mander 등의 연구에서는 철근에 균열이 발생하는 횟수를 반복횟수로 정의하였으나, 초기의 미세한 균열은 관측되기 어렵고 어느 정도 균열이 진전된 후에야 관측되는 어려움이 있으므로 이 연구에서는 완전히 두 개의 부분으로 파단되어 축하중이 측정되지 않는 시점의 반복횟수로 정의하였다.

4.2 균열 및 파괴거동

총 81개의 축방향철근 실험체에 대한 저주파 피로 실험이 수행되었으며 반복횟수에 대한 차이를 제외하면 대체로 유사한 균열발생 및 파괴거동을 나타내었다. 이 연구에서는 주요 실험변수 중 변형률 범위, 횡방향철근 수직간격과 축방향철근 지름의 비율(s/d_b)와 항복강도가 철근의 파단이 발생할 때까지의 반복횟수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주요 변수에 따라서 반복횟수의 차이를 보이지만 모든 철근 실험체들에서 파단이 발생하기 2~5회 전에 Fig. 6에 나타난 바와 같이 철근 길이방향에 수직한 방향으로

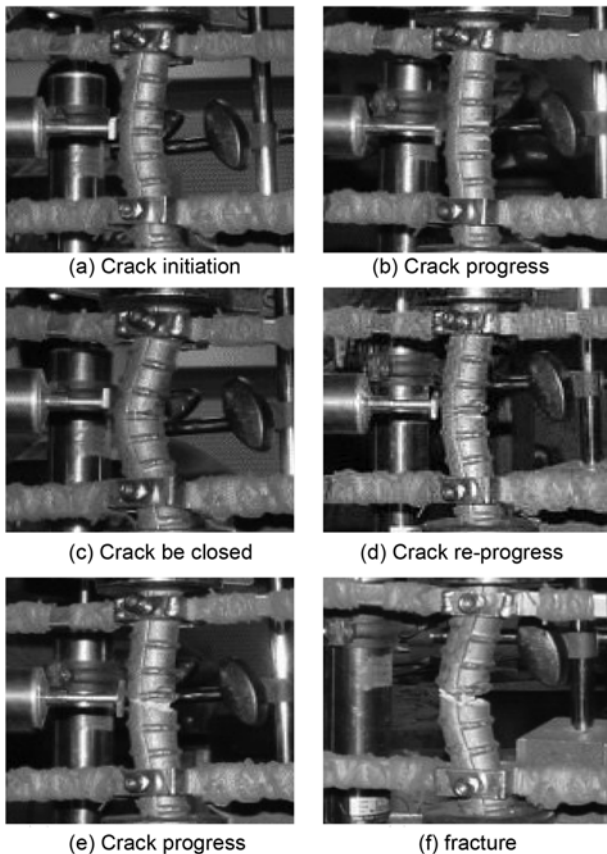


Fig. 6 Behavior of low-cycle fatigue specimen

균열이 발생되었다. Fig. 6(a)와 같이 최대 압축 상태에서 인장상태로 하중이 진행될 때 철근 중앙부 근처에서 압축면에서 균열이 관측되었고 Fig. 6(b)와 같이 인장하중이 증가됨에 따라 균열을 진전되었다. 최대 인장 변형률에 도달한 후 다시 압축되면 Fig. 6(c)와 같이 균열은 닫히게 되었고, 다시 인장하중이 재하되면 Fig. 6(d)와 같이 균열폭과 균열 길이는 확대·진전되었다. 철근 단면 중 압축면에서 시작된 균열이 점차 인장면으로 확대되어 파단되었다. 변형률 범위가 작은 경우는 균열발생 시점 및 균열발생 후 파단까지의 시점이 늦었지만 변형률 범위가 크거나 횡방향철근 수직간격과 철근지름의 비율이 큰 경우는 균열발생 시점이 앞당겨졌고, 균열발생 직후의 반복횟수에서 파단이 발생하는 경향을 나타내었다.

4.3 변형률-반복횟수 이력거동

전체 81개의 축방향철근 실험체에 대한 실험 결과 중에서 대표적인 이력곡선(hysteresis loop)을 Figs. 7~10에 나타내었으며 Table 4에 실험 결과를 정리하였다.

최초의 반복 이력에서 항복응력을 초과하는 인장하중이 재하된 후 다시 압축하중이 재하될때 바우싱어 효과(Bauschinger effect)에 의해서 항복응력보다 낮은 응력에서 소성변형이 시작되는 현상이 나타나며 이후의 하중재하에서도 유사한 현상이 나타난다. 최초의 하중방향이 압축일 경우에도 동일한 현상을 보였다. Fig. 7은 D16 철근의 인장변형률과 압축변형률의 비율이 3:1($SR=-3$)이고 철근길이와 지름의 비율(s/d_b)이 6인 실험 결과로 철근의 항복강도는 359~386 MPa로 계측되었다.

Fig. 7의 (a), (c), (e), (g), (i)에 항복변형률의 10~65배 범위의 변형률에 대한 응력-변형률 이력곡선을 나타내었고, Fig. 7의 (b), (d), (f), (h), (j), (k)는 최초의 이력곡선의 인장 및 압축응력의 최대 절대값과 각각의 이력곡선에서 계측된 인장 및 압축응력의 최대 절대값의 비율을 나타내 것이다. 실선은 인장응력 저감을 나타내고 점선은 압축응력의 저감을 나타낸다. 항복변형률의 10배에 대한 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 반복횟수가 증가함에 따라서 거의 직선적으로 응력이 저감되다가 반복횟수 40회에서 균열이 발생된 이후에 급격히 응력이 감소하는 현상을 나타내고 있다. 또한 변형률 범위가 $10\epsilon_y$ 인 Fig. 7(b)에서 균열발생 후 4회의 이력거동을 보이고 45회 이력에서 파단이 발생되었으나 변형률 범위가 $50\epsilon_y$ 인 Fig. 7(g)에서는 균열발생 후 이어지는 이력에서 철근이 파단되었다.

Fig. 7의 (j)와 (k)에 나타난 바와 같이 변형률 범위가 증가할수록 응력 저감의 정도가 심화되고 있으며 파단이 발생하는 반복횟수는 감소하는 경향을 나타내었다.

Figs. 9, 10에 나타난 바와 같이 동일한 변형률 범위일 지라도 항복강도가 증가됨에 따라 파단이 발생하는 반복횟수는 감소하고 있으며 응력이 저감되는 비율도 증가되고 있다. Fig. 8은 인장변형률과 압축변형률 범위의 비율

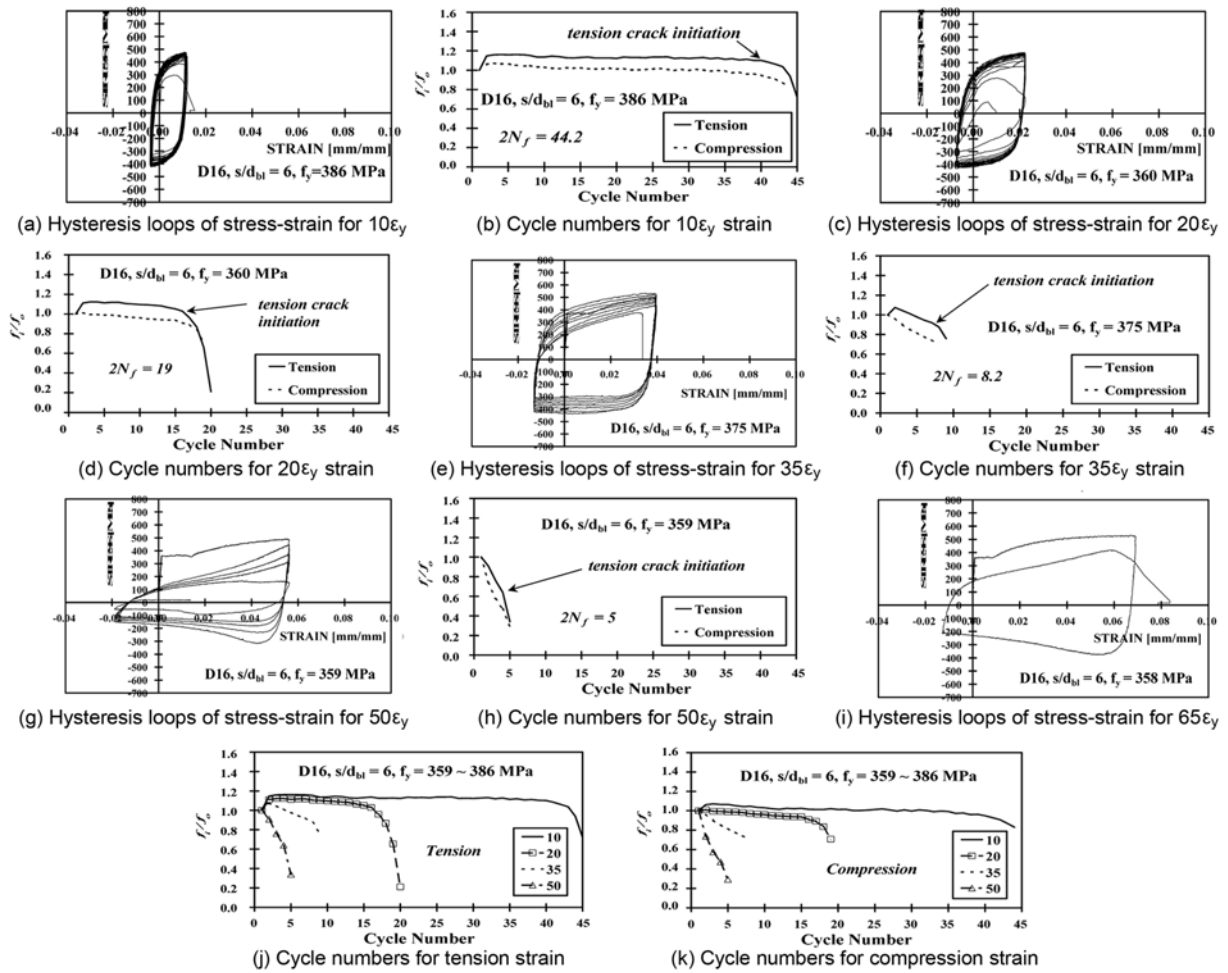


Fig. 7 Test result of GROUP I (D16, $f_y = 359\sim 386$ MPa)

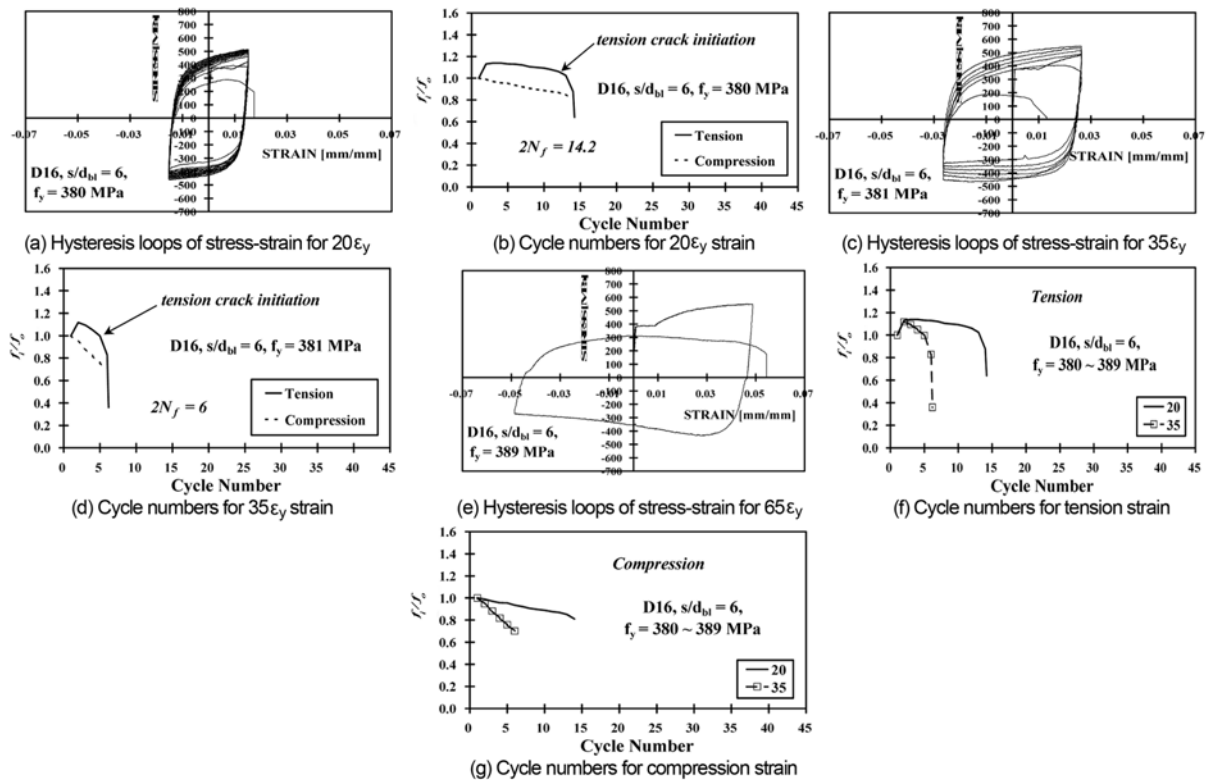


Fig. 8 Test results of GROUP II (D16, $f_y = 380\sim 389$ MPa)

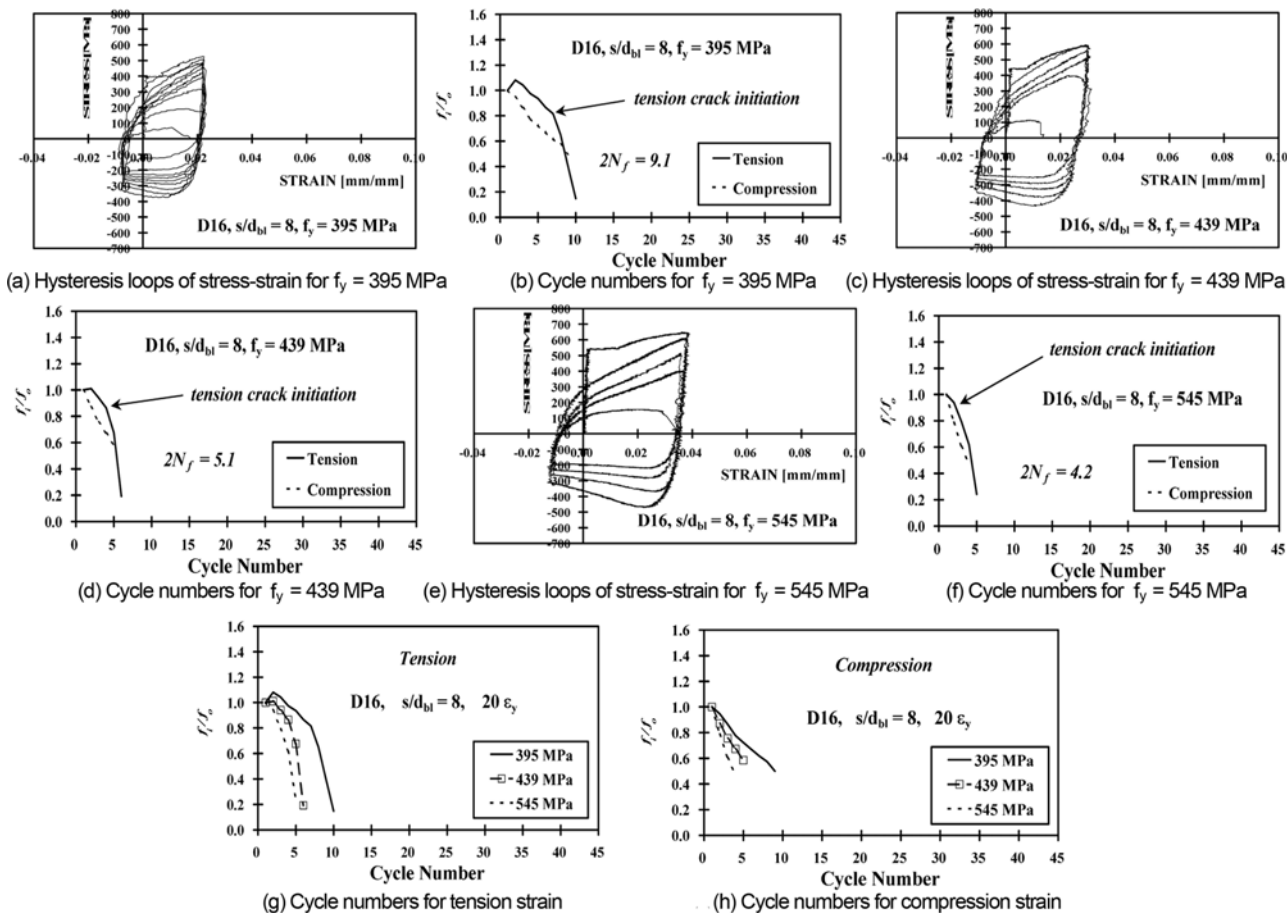


Fig. 9 Test result of GROUP III (D16, $f_y = 395\sim 545$ MPa)

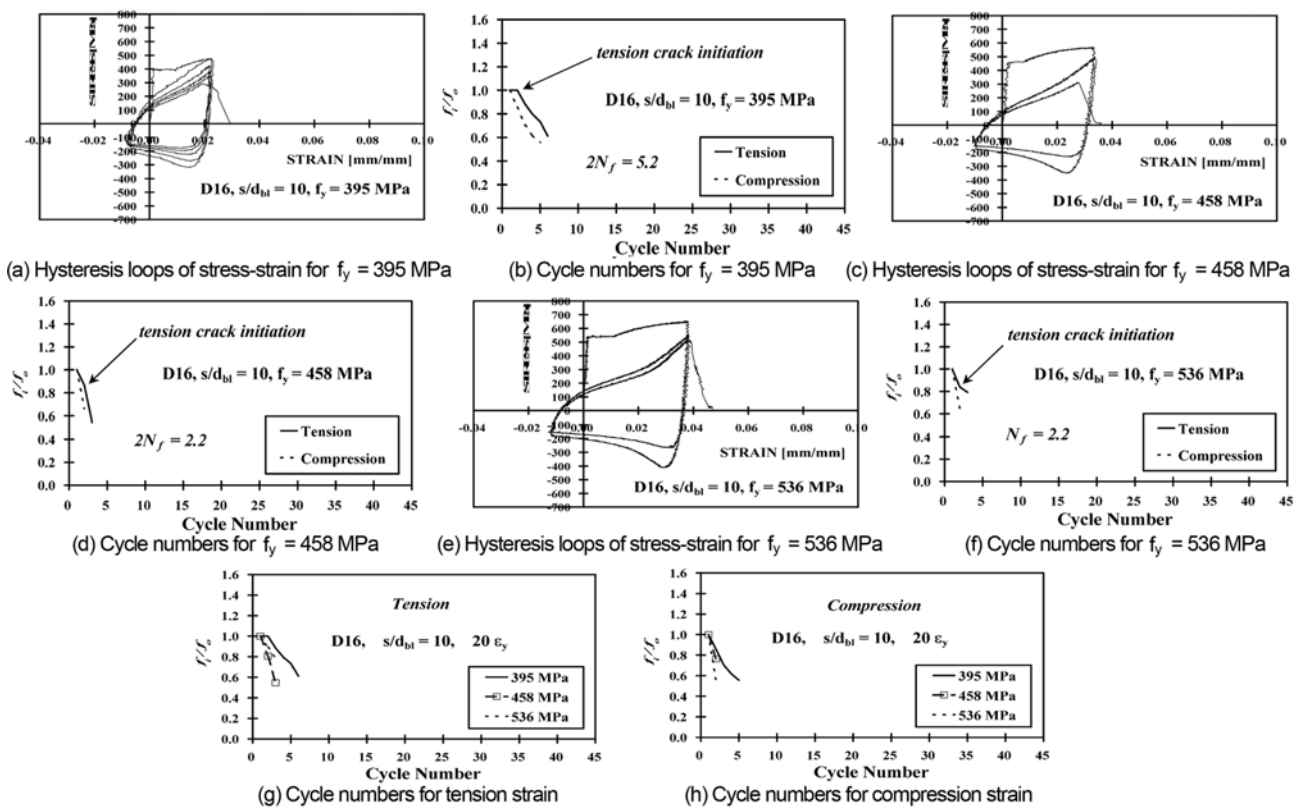


Fig. 10 Test results of GROUP IV (D16, $f_y = 395\sim 536$ MPa)

Table 4 Summary and comparison of test results

| No. | d_{bl} | $\frac{s}{d_{bl}}$ | S.R. | ε_a | ε_p | E_s (GPa) | f (Hz) | $2N_f$ | ΔW_p | W_{fi} | No. | d_{bl} | $\frac{s}{d_{bl}}$ | S.R. | ε_a | ε_p | E_s (GPa) | f (Hz) | $2N_f$ | ΔW_p | W_{fi} |
|-----|---------------|--------------------|------|-----------------|-----------------|----------------|-----------|--------|--------------|----------|--------|---------------|--------------------|------|-----------------|-----------------|----------------|-----------|--------|--------------|----------|
| 1 | 15.9 mm (D16) | 6 | -1 | 0.0075 | 0.0060 | 216 | 38 | 44.2 | 9.6 | 424 | 42 | 15.9 mm (D16) | 6 | -1 | 0.0487 | 0.0472 | 219 | 364 | 1.2 | 66.9 | 80 |
| 2 | | | | 0.0148 | 0.0133 | 217 | 41 | 19.0 | 18.4 | 350 | 43 | | | | 0.0209 | 0.0188 | 206 | 134 | 5.1 | 30.9 | 158 |
| 3 | | | | 0.0253 | 0.0238 | 199 | 77 | 8.2 | 35.3 | 289 | 44 | | | | 0.0350 | 0.0331 | 208 | 210 | 3.0 | 62.6 | 189 |
| 4 | | | | 0.0376 | 0.0361 | 212 | 168 | 5.0 | 24.3 | 121 | 45 | | | | 0.0665 | 0.0644 | 207 | 633 | 0.8 | 109.8 | 88 |
| 5 | | | | 0.0486 | 0.0471 | 218 | 306 | 1.2 | 66.7 | 80 | 46 | | | | 0.0251 | 0.0226 | 206 | 164 | 4.0 | 49.8 | 200 |
| 6 | | | | 0.0099 | 0.0080 | 210 | 34 | 22.1 | 14.3 | 317 | 47 | | | | 0.0443 | 0.0417 | 219 | 310 | 1.1 | 65.5 | 73 |
| 7 | | | | 0.0198 | 0.0178 | 219 | 67 | 10.2 | 33.0 | 336 | 48 | | | | 0.0160 | 0.0145 | 217 | 89 | 9.1 | 22.1 | 201 |
| 8 | | | | 0.0351 | 0.0330 | 199 | 202 | 2.2 | 65.0 | 143 | 49 | | | | 0.0264 | 0.0249 | 213 | 145 | 3.1 | 45.4 | 139 |
| 9 | | | | 0.0440 | 0.0423 | 211 | 425 | 1.2 | 89.8 | 108 | 50 | | | | 0.0486 | 0.0471 | 216 | 323 | 1.2 | 78.1 | 94 |
| 10 | | | | 0.0649 | 0.0629 | 216 | 431 | 1.2 | 106.2 | 127 | 51 | | | | 0.0212 | 0.0191 | 218 | 112 | 6.1 | 34.5 | 211 |
| 11 | | | | 0.0135 | 0.0109 | 201 | 62 | 15.2 | 20.0 | 304 | 52 | | | | 0.0350 | 0.0330 | 201 | 207 | 2.2 | 63.3 | 139 |
| 12 | | | | 0.0215 | 0.0195 | 205 | 131 | 5.2 | 30.0 | 156 | 53 | | | | 0.0650 | 0.0630 | 217 | 551 | 0.8 | 119.8 | 96 |
| 13 | | | | 0.0439 | 0.0414 | 222 | 414 | 1.2 | 84.7 | 102 | 54 | | | | 0.0248 | 0.0223 | 202 | 153 | 4.2 | 46.0 | 193 |
| 14 | 19.1 mm (D10) | -3 | -1 | 0.0076 | 0.0060 | 219 | 54 | 31.1 | 8.8 | 275 | 55 | 19.1 mm (D10) | -3 | -1 | 0.0441 | 0.0416 | 207 | 372 | 1.1 | 103.8 | 114 |
| 15 | | | | 0.0155 | 0.0139 | 217 | 140 | 9.1 | 27.0 | 243 | 56 | | | | 0.0158 | 0.0142 | 202 | 94 | 7.1 | 21.9 | 155 |
| 16 | | | | 0.0263 | 0.0248 | 201 | 193 | 3.2 | 37.5 | 120 | 57 | | | | 0.0261 | 0.0246 | 219 | 102 | 5.2 | 36.7 | 189 |
| 17 | | | | 0.0375 | 0.0360 | 219 | 327 | 1.2 | 65.0 | 78 | 58 | | | | 0.0488 | 0.0473 | 217 | 526 | 0.8 | 79.5 | 65 |
| 18 | | | | 0.0487 | 0.0472 | 210 | 313 | 1.2 | 62.8 | 75 | 59 | | | | 0.0211 | 0.0190 | 207 | 56 | 7.0 | 34.0 | 238 |
| 19 | | | | 0.0102 | 0.0081 | 200 | 90 | 27.2 | 11.0 | 298 | 60 | | | | 0.0353 | 0.0333 | 206 | 186 | 3.1 | 51.2 | 159 |
| 20 | | | | 0.0225 | 0.0203 | 207 | 161 | 9.2 | 30.4 | 280 | 61 | | | | 0.0660 | 0.0640 | 210 | 321 | 1.2 | 159.3 | 185 |
| 21 | | | | 0.0350 | 0.0331 | 198 | 173 | 3.2 | 55.6 | 178 | 62 | | | | 0.0255 | 0.0230 | 209 | 48 | 9.0 | 44.2 | 398 |
| 22 | | | | 0.0532 | 0.0511 | 201 | 203 | 2.1 | 79.0 | 162 | 63 | | | | 0.0447 | 0.0421 | 202 | 126 | 2.7 | 89.7 | 238 |
| 23 | | | | 0.0752 | 0.0729 | 217 | 386 | 1.1 | 142.2 | 149 | 64 | | | | 0.0153 | 0.0138 | 209 | 107 | 9.1 | 14.6 | 133 |
| 24 | 0.0129 | 0.0104 | 208 | 189 | 8.1 | 23.2 | 188 | 65 | 0.0204 | 0.0184 | 200 | 136 | 5.1 | 23.0 | 117 | | | | | | |
| 25 | 0.0256 | 0.0231 | 215 | 239 | 3.1 | 43.9 | 136 | 66 | 0.0252 | 0.0228 | 218 | 233 | 4.2 | 28.6 | 120 | | | | | | |
| 26 | 0.0426 | 0.0401 | 219 | 319 | 2.1 | 78.9 | 166 | 67 | 0.0154 | 0.0139 | 219 | 183 | 5.2 | 15.3 | 79 | | | | | | |
| 27 | 22.2 mm (D22) | -3 | -1 | 0.0075 | 0.0060 | 216 | 126 | 30.1 | 7.7 | 232 | 68 | 22.2 mm (D22) | -3 | -1 | 0.0209 | 0.0188 | 211 | 192 | 4.2 | 24.9 | 104 |
| 28 | | | | 0.0150 | 0.0135 | 219 | 26 | 26.1 | 18.8 | 491 | 69 | | | | 0.0250 | 0.0225 | 217 | 203 | 3.2 | 31.6 | 101 |
| 29 | | | | 0.0270 | 0.0255 | 218 | 185 | 4.1 | 40.6 | 166 | 70 | | | | 0.0151 | 0.0136 | 218 | 115 | 13.2 | 10.3 | 136 |
| 30 | | | | 0.0375 | 0.0360 | 198 | 308 | 1.1 | 58.3 | 64 | 71 | | | | 0.0201 | 0.0181 | 207 | 265 | 3.2 | 54.6 | 175 |
| 31 | | | | 0.0490 | 0.0475 | 217 | 349 | 1.2 | 73.9 | 86 | 72 | | | | 0.0246 | 0.0221 | 218 | 284 | 1.4 | 41.9 | 60 |
| 32 | | | | 0.0097 | 0.0078 | 219 | 80 | 11.1 | 15.2 | 169 | 73 | | | | 0.0152 | 0.0136 | 203 | 208 | 5.2 | 12.9 | 67 |
| 33 | | | | 0.0223 | 0.0201 | 219 | 107 | 9.0 | 35.0 | 246 | 74 | | | | 0.0215 | 0.0193 | 199 | 383 | 2.2 | 22.3 | 49 |
| 34 | | | | 0.0351 | 0.0331 | 218 | 111 | 4.1 | 59.4 | 241 | 75 | | | | 0.0241 | 0.0217 | 203 | 522 | 2.2 | 31.5 | 68 |
| 35 | | | | 0.0495 | 0.0476 | 198 | 420 | 1.0 | 94.1 | 94 | 76 | | | | 0.0151 | 0.0135 | 218 | 188 | 5.2 | 13.1 | 68 |
| 36 | | | | 0.0647 | 0.0627 | 199 | 447 | 0.9 | 122.9 | 119 | 77 | | | | 0.0200 | 0.0180 | 219 | 246 | 3.2 | 22.9 | 72 |
| 37 | 0.0131 | 0.0106 | 217 | 35 | 16.1 | 21.0 | 338 | 78 | 0.0252 | 0.0226 | 209 | 263 | 2.2 | 31.0 | 68 | | | | | | |
| 38 | 0.0259 | 0.0233 | 204 | 170 | 5.2 | 46.1 | 238 | 79 | 0.0150 | 0.0135 | 215 | 230 | 2.2 | 19.7 | 42 | | | | | | |
| 39 | 0.0435 | 0.0410 | 200 | 432 | 0.7 | 113.3 | 82 | 80 | 0.0200 | 0.0180 | 201 | 132 | 2.3 | 19.0 | 43 | | | | | | |
| 40 | 15.9 mm (D16) | -1 | -1 | 0.0158 | 0.0142 | 218 | 7 | 14.2 | 20.7 | 294 | 81 | 15.9 mm (D16) | -1 | -1 | 0.0250 | 0.0225 | 201 | 478 | 0.8 | 54.0 | 41 |
| 41 | 0.0265 | | | 0.0250 | 214 | 111 | 6.0 | 37.0 | 223 | 82 | 0.0250 | | | | 0.0225 | 201 | 478 | 0.8 | 54.0 | 41 | |

ΔW_p : cyclic hysteresis energy, W_{fi} : total energy

이 동일한 실험 결과(SR = -1)를 나타내며 변형률 범위를 제외하면 Fig. 7의 결과와 동일한 변수에 의한 결과이다. 이 경우 작은 반복횟수에서 철근이 파단되는 이유는 압축변형률이 크기때문에 균열과 파단이 빨리 발생하는 것으로 판단된다. Figs. 9와 10은 철근 길이와 지름의 비(s/d_{bl})가 8과 10인 경우이다. 동일한 변수에서 s/d_{bl} 이 증가하면 균열 및 파단 발생의 반복횟수가 감소하고, 응력저감의 정도는 심화되었다. 모든 실험 결과에서 반복횟

수 1회에 대한 평균 주기(f , Hz)는 26~447이었으며 전 변형률 ε_a 의 범위는 0.0075~0.0752, 소성변형률 ε_p 의 범위는 0.0060~0.0729로 측정되었다.

이 연구와 Mander 등⁸⁾에 의해 수행된 연구의 실험변수가 동일하지 않기 때문에 ε_a 의 범위가 일치하거나 유사한 일부의 결과만을 비교하여 Table 5에 나타내었다. 이 연구의 국내산 철근에 대한 저주파 피로 실험 결과에서는 Mander 등⁸⁾에 의해 수행된 실험 결과보다 저주

Table 5 Comparison of test result

| Mander's test | | | Test result | | | ②/① |
|---------------|--------------|----------|---|----------------------|------------------|------|
| Specimen | ϵ_a | $2N_f$ ① | Specimens | Ave. of ϵ_a | Ave. of $2N_f$ ② | |
| R12 | 0.04 | 2.5 | 4, 9, 17, 26, 30 | 0.0398 | 2.1 | 0.84 |
| R9 | 0.025 | 5.6 | 3, 25, 38, 46, 57, 66, 69, 78, 81 | 0.0254 | 4.0 | 0.71 |
| R5 | 0.02 | 9.2 | 7, 12, 43, 51, 59, 65, 71, 74, 80 | 0.0207 | 5.2 | 0.57 |
| R7 | 0.015 | 21 | 2, 15, 28, 40, 48, 56, 64, 67, 70, 76, 79 | 0.0153 | 10.8 | 0.51 |
| R21 | 0.0134 | 25 | 11, 37 | 0.0133 | 15.7 | 0.63 |
| R4 | 0.01 | 49 | 6, 19 | 0.0101 | 24.7 | 0.50 |
| R8 | 0.008 | 148 | 1, 14, 27 | 0.0075 | 35.1 | 0.24 |

파 파괴 수명이 24~84% 정도 짧게 나타났으며 특히, 변형률 범위가 0.0075인 경우에 24% 정도의 파괴수명을 나타내었다.

5. 결 론

- 1) 반복되는 횡하중을 받는 부재 내에 위치한 축방향 철근의 인장과 압축 변형률의 비율을 파악하기 위하여 재료비선형 모멘트-곡률 해석을 수행하였다. 해석결과, 인장 변형률과 압축 변형률 비율의 범위는 1.591~4.5이며 평균 값은 약 3 : 1의 비율임을 도출하였다.
- 2) 인장하중이 재하된 후 압축하중이 재하될 때 바우싱어 효과(Bauschinger effect)에 의해서 항복응력보다 낮은 응력에서 소성변형이 시작되는 현상이 계측되었다.
- 3) 이 연구에서는 주요 실험변수 중 변형률 범위, 철근길이와 지름의 비율(s/d_b), 항복강도가 철근의 피로수명에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 4) 변수에 따라서 피로수명의 차이를 보이나 모든 철근 실험체들에서 파단이 발생하기 2~5회 전에 철근 길이방향에 수직인 방향으로 균열이 발생되었다. 압축 및 인장 하중이 반복 재하됨에 따라 철근의 균열폭과 균열길이는 확대 · 진전되었다.
- 5) 변형률 범위가 증가할수록 응력 저감의 정도가 심화되고 있으며 저주파 피로수명은 감소하는 경향을 나타내었다. 동일한 변형률 범위일지라도 항복강도가 증가됨에 따라 저주파 피로수명은 감소하고 있으며 응력이 저감되는 비율도 심화되었다.
- 6) 인장 변형률과 압축 변형률의 비율이 1 : 1인 경우에 변형률의 비율이 3 : 1인 경우보다 작은 저주파 피로수명을 보이는 이유는 압축변형률이 크기 때문인 것으로 판단된다.
- 7) 이 연구와 Mander 등이 수행한 연구의 실험변수 차이로 인해서 모든 실험 결과의 변형률 범위가 동일

하지는 않다. 실험 결과 중 변형률 ϵ_a 의 범위가 일치하거나 유사한 일부의 결과만을 비교하면 국내산 철근의 저주파 피로 수명이 Mander 등에 의해 수행된 실험 결과보다 평균 57% 정도로 짧게 계측되었다. 변형률 ϵ_a 의 범위가 0.025 이상인 경우에 Mander 등에 의해 수행된 실험 결과의 71~84%, ϵ_a 의 범위가 0.02~0.01인 경우에 50~63%, ϵ_a 의 범위가 0.0075인 경우에 24%의 짧은 저주파 피로수명을 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단(KBRC) 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. Jaradat, O. A., McLean, D. I., and Marsh, M. L., "Performance of Existing Bridge Columns under Cyclic Loading-Part 1: Experimental Results and Observed Behavior," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 6, 1998, pp. 695~704.
2. Xiao, Y. and Yun, H. W., "Experimental Studies on Full-Scale High-Strength Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 2, 2002, pp. 199~207.
3. 이재훈, 배성용, 윤석규, "나선철근교각의 내진성능실험," 대한토목학회논문집, 21권, 1-A호, 2001, pp. 109~121.
4. 정영수, 박창규, 고성현, 이재훈, "주철근 겹침이음된 실물 비내진 원형 교각의 내진성능평가," 콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, 2004, pp. 697~707.
5. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, "주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가," 대한토목학회논문집, 22권, 5-A호, 2002, pp. 1193~1201.
6. 김태훈, 김운학, 신현목, "반복횡하중을 받는 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동 및 연성거동," 콘크리트학회 논문집, 14권, 4호, 2002, pp. 467~473.
7. Dutta, A. and Mander, J. B., "Energy Based Methodology for Ductility Design of Concrete Columns," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 12, 2001, pp. 374~1381.
8. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, A., "Low-cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453~468.
9. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804~1826.
10. Shin, H. M., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to lead Reversals," Doctoral Thesis, University of Tokyo, 1988, 224 pp.
11. Hsu, T. T. C., *Unified Theory of Reinforced Concrete*, CRC Press, Inc., Boca Raton, 1993, pp. 205~256.
12. Maekawa, K., Pimanmas, A., and Okamura, H., *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon press, New York, 2003, pp. 682~711.

요 약 이 연구는 국내에서 생산되고 있는 철근이 반복하중을 받는 경우의 파괴 특성에 대한 검증을 목적으로 한다. 이 논문은 철근콘크리트 하부구조(파일과 교각)에 배근된 축방향 철근에 대한 저주파 피로 거동을 다루었다. 전체 81개의 철근 실험체에 대하여 변형률 진폭에 따른 반복 축방향 변형률 제어 방식으로 저주파 피로 실험을 수행하였다. 실험 변수는 인장변형률과 압축변형률의 비율, 축방향 철근의 항복강도, 철근지름에 대한 철근길이의 비율, 철근의 크기와 변형률 진폭으로 선택하였다. 이 논문에서 실험 결과에 따른 저주파 피로 거동과 저주파 피로 수명을 분석하였다.

핵심용어 : 저주파 피로, 파괴, 피로, 변형률 진폭