

강섬유 보강 철근콘크리트 2경간 연속보의 피로거동에 관한 연구

곽계환^{1)*} · 조선정¹⁾ · 석인수²⁾

¹⁾원광대학교 토목환경공학과

²⁾원광대학교 토목환경공학과 (전라북도 도청 건설교통국)

(2001년 8월 31일 원고접수, 2003년 3월 21일 심사완료)

A Study on Fatigue Behavior of Two-Span Fiber Reinforced Concrete Beam

Kae-Hwan Kwak¹⁾, Seon-Jeong Cho¹⁾, and In-Soo Seok²⁾

¹⁾ Dept. of Civil & Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksan, 570-749, Korea

²⁾ Wonkwang University, Iksan (N. Jeolla Province, Bureau Construction & Transportation)

(Received August 31, 2001, Accepted March 21, 2003)

ABSTRACT

As concrete structures are getting larger, higher, longer, and specialized, it is more required to develop steel fiber concrete and apply to the real world. In this research, it is aimed to have fatigue strength examined, varying the steel fiber content by 0%, 0.75%, 1.00%, 1.25%, by experimental study of Two-spans Beam with Steel Fibrous with repeated loads. The ultimate load and the initial load of flexural cracking were measured by static test. In addition, the load versus strain relation, load versus strain relation, load versus deflection relation, crack pattern and fracture mode by increasing weight was observed. On the other hand, the crack propagation and the modes of fracture according to cycle number and the relation of cycle loading to deflection relation and strain relation was observed by fatigue test.

As the result of fatigue test, Two-spans Beam without Steel Fibrous was failed at 60~70% of the static ultimate strength and it could be concluded that fatigue strength to two million cycle was around 67.2% by S-N curve. On the other hand, that with Steel Fibrous was failed at 65~85% of the static ultimate strength and it could be concluded fatigue strength to two million cycle around 71.7%.

Keyword : the steel fibrous concrete, two-spans beam, V_f -the steel fibrous content varying, S-N curve

1. 서 론

경제성장은 필연적으로 물동량의 증가를 가져오게 되며 물동량의 증가는 교량통과하중의 증대와 교통량의 증가로 발전하게 된다. 이것은 교량의 균열발생과 균열성장, 그리고 파괴로 이어져 사용성 및 안전성의 문제를 초래하고 있다¹⁾. 이와 같은 문제점을 해결하는 동시에 철근콘크리트 구조물의 사용성과 안전성을 높이는데 강섬유를 적용함으로써 콘크리트 구조물의 단점인 취성파괴를 연성파괴로 유도하며²⁾, 2경간 연속교는 단경간에 비해 중간지점상의 설계 휨모멘트를 검증할 수 있어 그에 따른 경제적 효과를 극대화 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 강섬유를 혼입한 2경간 연속보의 피로거동을 파악하기 위하여 기본 실험과 정적실험 그리고 피로실험으로 나누어 실험을 실

시하였다. 기본실험에서는 강섬유 혼입율에 따른 압축강도와 할렬인장강도를 고찰하고, 정적실험에서는 보의 극한하중, 정, 부모멘트부의 초기 휨균열하중 등을 측정하고 하중과 철근의 변형률관계, 하중과 처짐관계, 하중증가에 따른 균열진전과 파괴양상등을 고찰하였다. 피로실험에서는 반복횟수와 처짐관계, 반복횟수와 변형률 관계 그리고 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상을 관찰하였으며, 피로 실험결과로부터 피로수명과 반복횟수의 관계를 정립하기 위하여 S-N 곡선과 피로강도 추정식을 도출하여 강섬유를 혼입율에 따른 2경간 연속보에 대한 피로특성을 비교 검토하고 피로강도를 규명하고자 하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료 및 배합설계

2.1.1 사용재료

강섬유를 혼입한 콘크리트의 배합설계를 위하여 국내 D

* Corresponding author

Tel : 063-850-6720 Fax : 063-857-7204

E-mail : kkh6720@wonwms.wonkwang.ac.kr

사 제품인 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 비중이 2.62, 조립율이 2.73인 잔골재를 사용하였다. 또한 굵은골재의 비중은 2.58, 조립율은 6.57 인 최대치수 25mm의 쇄석을 사용하였다. 시편 제작에 사용된 철근은 이형철근으로 인장, 압축 철근은 D19, 전단보강에 사용된 철근은 D10을 사용하였다. 강섬유 혼입으로 인한 워커빌리티의 저하를 방지하기 위하여 고성능감수제로서 비중이 1.21, pH8.0의 암갈색인 PowerCon-100을 사용하였으며, 본 실험에 사용된 강섬유는 벨기에 D사의 제품으로서 양단혹크형을 사용하였고 비중은 7.85이며 형상비는 80(=60/0.75)이었다. 사용된 강섬유의 종류 및 물리적 성질은 Table 1 과 같다.

2.1.2 배합설계

배합설계는 강섬유 혼입율(V_f) 0%, 0.75%, 1.0%, 1.25%의 변화를 주어 실시하였고 적절한 워커빌리티를 도출하기 위해 수차례의 시험배합을 수행하여 Table 2와 같은배

Table 1 Physical properties and shapes of steel fibrous

| Aspect ratio (l/d) | Length (mm) | Diameter (mm) | Tensile strength (kgf/cm ²) | Shape of section | Specific gravity |
|------------------------|-------------|---------------|---|------------------|------------------|
| 60 | 60 | 1.0 | 11,000 | square | 7.85 |

Table 2 Mix proportion

| Series | Max. size (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit volume (kg/m ³) | | | | | |
|--------|----------------|------------|---------|---------|---------|----------------------------------|-----|--------|--------|------------------------|-----------|
| | | | | | | W | C | S | G | SP (g/m ³) | V_f (%) |
| RC 1 | 25 | 10 | 2 | 42.5 | 45.7 | 156.24 | 433 | 711.24 | 951.83 | 866 | 0 |
| SFRC 1 | 25 | 6 | 2.6 | 42.5 | 45.7 | 156.24 | 433 | 711.24 | 951.83 | 1732 | 0.75 |
| SFRC 2 | 25 | . | 4 | 42.5 | 45.7 | 156.24 | 433 | 711.24 | 951.24 | 2598 | 1.00 |
| SFRC 3 | 25 | . | 4 | 42.5 | 45.7 | 169.93 | 433 | 703.65 | 946.15 | 2165 | 1.25 |

SP : Superplasticizers, V_f : Fibrous content

Table 3 Test results of compressive and splitting tensile strength

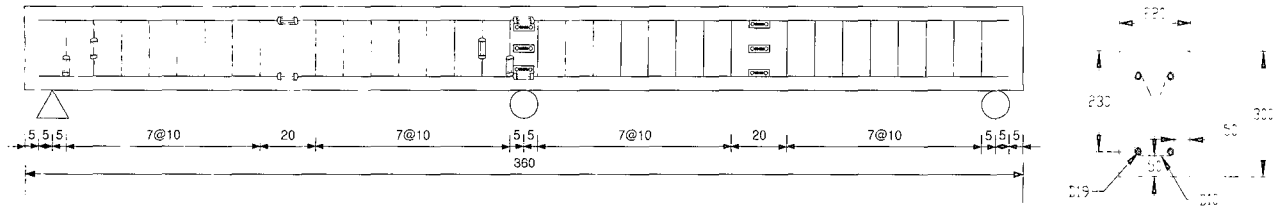
| Series | Compressive strength (f_{ck}) kgf/cm ² | | Tensile strength (f_{sp}) kgf/cm ² | | f_{ck}/f_{sp} |
|-------------------------|---|--------|---|--------|-----------------|
| | 7-day | 28-day | 7-day | 28-day | |
| RC 1 ($V_f=0\%$) | 283 | 421 | 26.5 | 40.17 | 10.48 |
| SFRC 1 ($V_f=0.75\%$) | 276 | 431 | 34.1 | 50.61 | 8.51 |
| SFRC 2 ($V_f=1.00\%$) | 296 | 450 | 40.8 | 54.58 | 8.24 |
| SFRC 3 ($V_f=1.25\%$) | 312 | 475 | 47.4 | 66.74 | 7.12 |

합설계를 도출하였다.³⁾

강섬유를 혼입한 콘크리트의 압축강도와 쪼갬 인장강도를 측정하기 위하여 강섬유의 형상비가 30이상이므로 $\phi=15 \times 30$ cm의 몰드를 사용하였으며 압축강도는 KS규정에 따라 실험을 실시하였고 같은 규정에 따라 쪼갬 인장강도 실험을 실시하였다.⁷⁾ 본 실험에서는 강섬유 혼입율(V_f)에 따라 네가지 시리즈로 분류하여 RC-시리즈는 강섬유 혼입율 0%, SFRC1-시리즈는 강섬유 혼입율 0.75%, SFRC2-시리즈는 강섬유 혼입율 1.00%, SFRC3-시리즈는 강섬유 혼입율 1.25%로 하였다. 압축강도와 쪼갬 인장강도의 비는 Table 3과 같다.

2.2 시편 제작

본 연구에서 제작된 시편은 콘크리트 구조설계기준에 따라 강도설계법에 의한 시편설계를 실시하였다. 시편은 부모멘트 부의 인장파괴를 유도하기 위하여 전단보강을 100% 실시하였고, 15×30×360cm의 크기로 각 혼입율 별로 RC-시리즈 4개, SFRC-시리즈 각각 5개씩 제작하였으며 Table 4와 같다. 하중 및 반복횟수에 따른 철근의 변형율을 측정하기 위하여 인장, 압축철근 및 전단보강철근에 스트레인 게이지를 부착하였으며 경간중앙부의 처짐을 측정하기 위해 LVDT를 설치하였다. 또한 단면의 중립축변화를 파악하기 위해 매립형 콘크리트 게이지를 설치하였다. 실험부재의 치수 및 스트레인 게이지의 부착위치는 Fig 1과 같다.



○ : Steel strain gauge, □ : Concrete mold gauge

Fig. 1 Shape of test beams and loading arrangement (plane unit : cm, section unit : mm)

Table 4 Detail test specimens

| Series | f_{ck} (kgf/cm ²) | Size (cm) | Fibrous content V_f (%) | Shear span-depth ratio (a/d) |
|------------|------------------------------------|--------------|---------------------------------|--|
| RC 1~4 | 421 | 22×30×360 | 0 | 3.3 |
| SFRC 1-1~5 | 431 | 22×30×360 | 0.75 | 3.3 |
| SFRC 2-1~5 | 450 | 22×30×360 | 1.00 | 3.3 |
| SFRC 3-1~5 | 475 | 22×30×360 | 1.25 | 3.3 |

2.3 실험방법

2.3.1 실험장비 및 재하방법

정적실험 및 피로실험은 50tonf(Stroke=±150mm) 용량의 MTS 유압식 액츄에이터와 피로실험기를 이용하여 실시하였다. 정적실험은 2경간 연속보이므로 KS F 2403, JIS A 1106 및 KSF 2408의 규정에 의해 매분 1,656~2,070kgf의 하중을 가하여 하중제어방식으로 실험하였으며, 피로실험은^{5,7)} 각 경간의 하중 재하점 간격을 20cm로 하였고 가력방법은 4점 재하시험으로 각 경간의 중앙부에 하중제어방식으로 가력하였다.^{4,6)} 재하방법은 초기 1회에서 5회까지 정적하중을 재하한 후 반복하중을 가력하였으며 반복파형은 정현파로 하여 자동제어 되도록 하였다. 반복하중의 재하속도는 피로한계에 영향을 미치지 않는 범위인 5Hz(300C/min)로⁴⁾ 하였으며 최저 응력수준과 최고 응력수준의 비율인 응력비는 R=0.1으로 일정하게 하였다.

2.3.2 측정방법

실험에 앞서 모든 시편은 백색 페인트를 도포한 후 표면에 10cm간격으로 가로줄과 세로줄을 그어 콘크리트 균열성장 과정을 측정할 수 있도록 하였다. 정적실험은 보의 처짐을 측정하기 위해 각 경간의 중앙부에 LVDT를 설치하였고 시험체 내부에 설치한 철근 변형률 게이지와 콘크리트 변형률 게이지로 변형률을 MTS 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 피로실험에서는 초기 1회에서 5회까지 정적하중을 재하하였으며 그 이후에는 100회, 1,000회, 10,000회, 20,000회, 50,000회, 100,000회로 그리고 매 10만회씩 측정단위로 하여 시험체의 파괴시까지 측

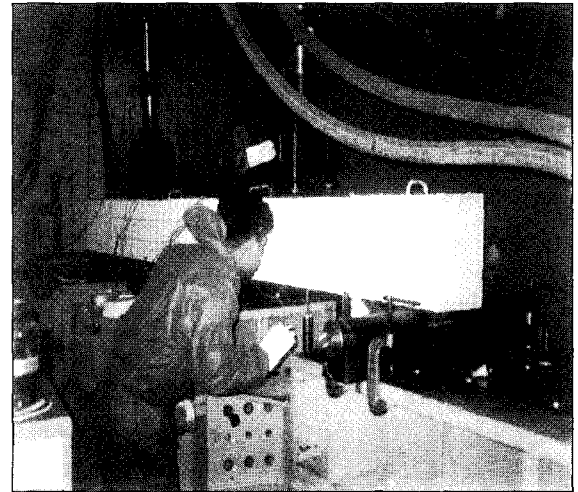


Fig. 2 Test specimen in loading frame

정하는 것을 원칙으로 하였다. 피로실험 광경은 Fig. 2와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정적실험

3.1.1 하중과 처짐 관계

Fig. 3에서 보는 바와 같이 시편 경간 중앙의 처짐은 초기에는 하중에 비례하여 비교적 선형적인 양상을 보이는 것을 알 수 있으며 일정한 선형탄성 부재임을 알 수 있다. 하중이 증가하면서 균열이 진전되어 보의 강성을 감소시키면서 처짐이 증가하였으며 철근의 항복강도를 지나면서 비선형으로 계속 증가하였다. 강섬유를 혼입하지 않은 시편인 RC보다 강섬유를 0.75% 혼입한 SFRC1-1, 2 시편의 파괴(정적극한하중의 파괴)시 하중에 대한 처짐이 최대 2.5배정도 크다는 것을 확인 할 수 있으며 이는 강섬유 혼입의 영향으로 강섬유 콘크리트에서 연성이 더 증가되었기 때문이다.

또한, 최대 모멘트는 부모멘트에서 발생하지만 파괴는 정모멘트에서 발생하는 현상으로 강섬유 혼입을 통한 연성증진 효과가 증대되고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5 Results of static test

| Name of beams | f_{ck} (kgf/cm ²) | V_f (%) | NP_{fc} (tf) | PP_{fc} (tf) | P_y (tf) | $*P_u$ (tf) | Failure mode |
|---------------|---------------------------------|-----------|----------------|----------------|------------|-------------|--------------|
| RC1 | 421 | 0 | 10.0 | 6.2 | 14.0 | 22.0 | Flexure |
| SFRC 1-1 | 431 | 0.75 | 21.0 | 4.1 | 21.0 | 24.5 | Flexure |
| SFRC 1-2 | | | 10.0 | 11.0 | 19.5 | 25.5 | Flexure |
| SFRC 2-1 | 450 | 1.00 | 16.0 | 6.4 | 20.5 | 23.0 | Flexure |
| SFRC 2-2 | | | 19.0 | 5.0 | 21.0 | 25.5 | Flexure |
| SFRC 3-1 | 475 | 1.25 | 12.0 | 10.1 | 22.0 | 24.0 | Flexure |
| SFRC 3-2 | | | 18.0 | 11.0 | 22.0 | 25.0 | Flexure |

f_{ck} : Compressive strength of concrete, V_f : Fibrous content, NP_{fc} : First negative flexural cracking load, PP_{fc} : First positive flexural cracking load, P_y : Static yield load, P_u : Static ultimate load to failure
 * P_u is the power of one actuator

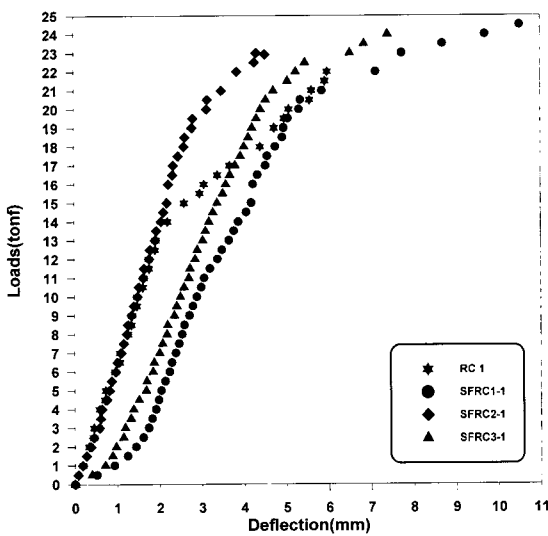


Fig. 3 Stress(Load)-deflection curve of static test

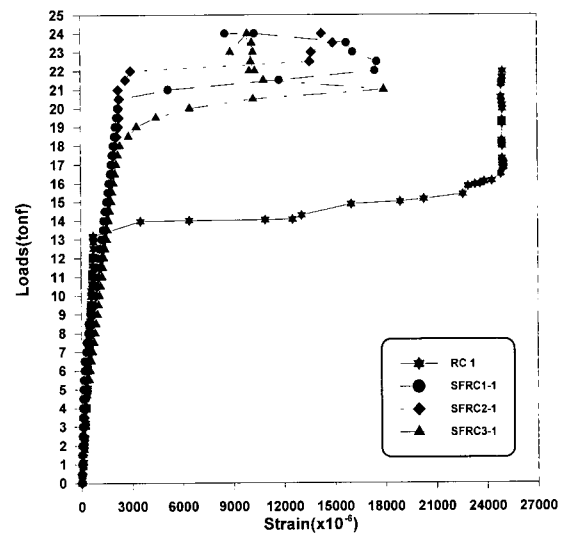


Fig. 4 Stress(Load) vs positive moment section tensile steel strain of static test

3.1.2 하중과 변형을 관계

시편의 변형율은 철근에 부착한 스트레인 게이지를 (Steel strain gauge) 이용하여 측정하였다. 정모멘트 발생 부에서 하중과 인장철근 변형율 관계는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 초기 휨균열이 발생되기 전까지는 선형적으로 증가하다가 균열이 발생되어 보의 강성이 적어지는 상태 부터 약간의 기울기를 가지고 다시 선형적으로 증가하는 모습을 볼 수 있다. 강섬유를 보강하지 않은 시편인 RC 1 은 강섬유가 보강된 SFRC-시리즈의 시편보다 낮은 하중에서 철근의 항복강도에 도달하고 동시에 큰 변형율을 보이며 파괴되었다. 반면에 강섬유를 혼입한 시편인 SFRC-시리즈는 철근의 항복강도에 도달하여 큰 변형율을 보이다가 시편에 혼입된 강섬유가 미세균열을 제어하는 동시에 균열사이에서의 진전을 제지하는 교량현상(Bridging)으로 추가적인 하중을 받더라도 변형율이 감소하는 것을 알 수 있으며 이는 시편에 혼입된 강섬유가 철근의 항복강도 이후에도 구조체로서의 기능을 상실하지 않도록 보강효과

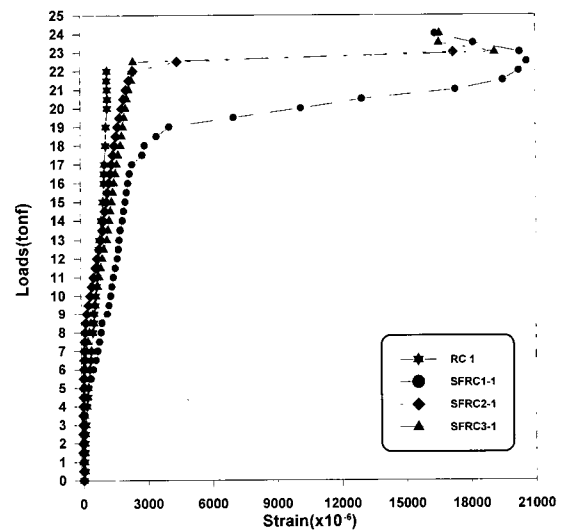


Fig. 5 Stress(Load) vs negative moment section tensile steel strain of static test

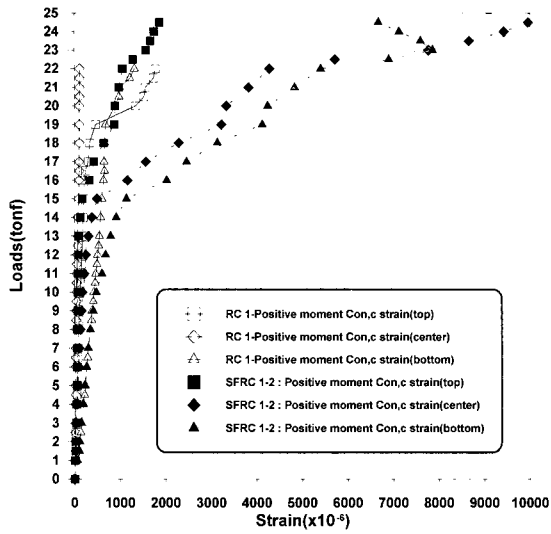


Fig. 6 Stress(Load) vs positive moment section concrete strain of static test

를 충분히 발휘하고 있음을 말해준다. Fig. 5는 부모멘트 발생부에서 하중과 인장철근 변형률 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 강섬유를 혼입하지 않은 시편인 RC 1은 변형률의 큰 변화없이 파괴가 이루어졌으나 강섬유를 혼입한 시편인 SFRC-시리즈는 부모멘트부에서도 큰 변형률의 변화와 항복강도 이후의 하중에도 변형률의 감소를 보이는 것을 알 수 있다. RC 1의 변형률 변화가 적은 것은 SFRC-시리즈보다 연성이 적기 때문이며, SFRC-시리즈의 부모멘트 부에서 큰 변형률 변화 및 항복강도 이후의 변형률 감소는 강섬유의 혼입이 연성을 증대시켜주는 것이라고 볼 수 있다. Fig. 6은 시편 내부에 설치한 콘크리트 변형률 게이지에서 측정된 RC 1과 SFRC1-2의 정모멘트부의 변형률이며, 시편 단면의 상,

중, 하로 나누어 측정하였다. 철근의 변형률과 마찬가지로 강섬유가 혼입되지 않은 RC 1 시편보다 강섬유가 혼입된 SFRC1-2 시편이 더 큰 변형률을 나타내는 것을 볼 수 있으며 강섬유 혼입이 시편의 연성을 증대시켜준다는 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

3.1.3 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상

KS F 2403, JIS A 1106 및 KSF 2408의 규정에 의해 매분 1,656~2,070kg의 하중을 가하여 하중제어방식으로⁷⁾ 실험한 결과 휨균열은 대부분 정모멘트 부의 순수 휨구간에서 초기 휨균열이 발생하였으며 하중을 증가시킴에 따라 미세하게 계속 성장하였다. 강섬유를 보강한 시편인 SFRC-시리즈의 경우는 균열이 복잡한 양상을 보이며 주 균열의 간격이 줄어들고 미세균열의 수가 증가하였으며 강섬유 혼입의 영향으로 인한 교란작용(Bridging)으로 초기 휨균열 폭을 제어하여 내력이 재분배됨으로서 2차, 3차의 미세균열을 형성하였다. 반면에 강섬유를 혼입하지 않은 시편인 RC 1은 휨균열의 간격이 넓고 미세균열의 수도 적은 것으로 나타났으며 철근의 항복강도를 넘어서는 약간의 추가하중만을 받아 파괴되는 경향을 보였다.

시편의 파괴양상은 전단보강철근의 영향으로 강섬유 혼입에 관계없이 휨파괴가 유발되었다. 또한 양쪽 경간의 정모멘트 부에서 하중이 집중되는 한부분이 파괴된 이후에 부모멘트 부가 파괴되었으며 부모멘트 부에서 파괴가 일어나거나 양쪽 정모멘트 부가 동시에 파괴되는 경우는 일어나지 않았다. 강섬유를 보강한 시편은 철근이 항복한 이후에도 강섬유로 인하여 어느정도 균열진전 제어의 효과가 있었으며 시편이 파단될 때 강섬유 자체가 파단되는 것이 아닌 뿔힘에 의해 파괴되었다. Fig. 7에 RC 1과 SFRC 1-1에 대한 균열성장 및 파괴양상을 나타내었고,

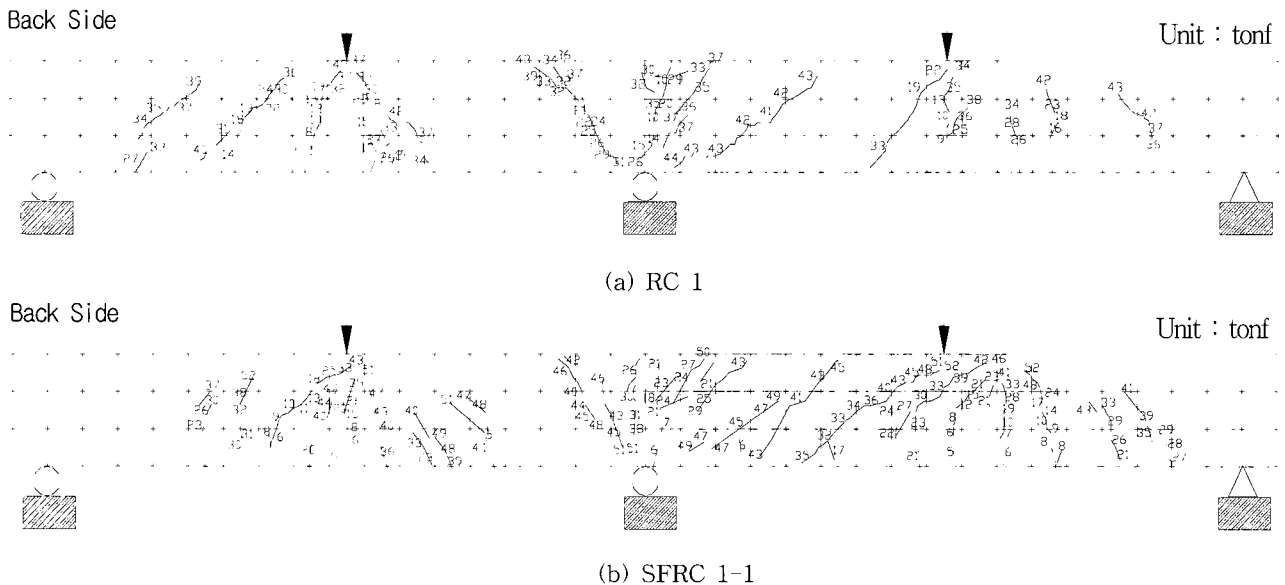


Fig. 7 Crack growth and failure mode for test beams

SFRC2, 3-시리즈 시편의 균열성장 및 파괴양상은 SFRC1-시리즈와 거의 동일하다.

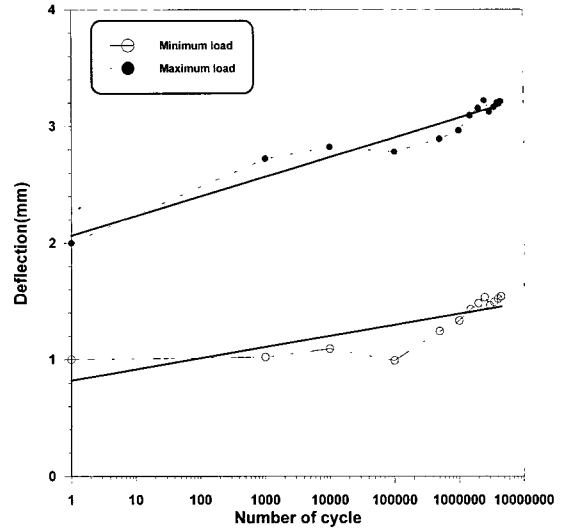
3.2 피로실험

3.2.1 반복횟수와 처짐 관계

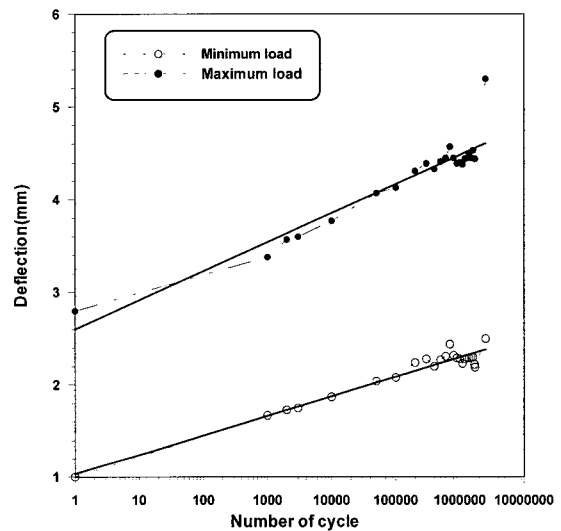
Fig. 8은 시편의 반복횟수와 중앙처짐 관계를 나타내었다. 반복하중 작용시 강섬유가 혼입되지 않은 RC 2 시편은 초기 휨균열이 전진되는 1~1,000회 사이에 상당한 처짐의 증가를 나타내었고 그 이후로 반복횟수가 증가함에 따라 처짐은 미세하게 증가하는 양상을 보였다. 반면 강섬유가 혼입된 SFRC 1-4 시편은 초기처짐보다는 반복횟수 10,000~700,000회 사이에서 상당한 처짐의 증가를 나타내었고 그 이후에 반복횟수가 증가함에 따라 미세하게 증가되었다. 피로실험에서의 처짐은 반복횟수의 영향보다는 작용하중의 범위나 응력범위에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었고 반복하중에 대한 처짐곡선을 통하여 최대하중과 최소하중의 진폭에 따른 처짐의 진행상황을 뚜렷이 파악할 수 있었다. 강섬유가 혼입되지 않은 RC-시리즈의 시편은 최대처짐과 최소처짐의 폭이 2mm를 벗어나지 못하였으나 강섬유가 혼입된 SFRC-시리즈의 시편은 최대처짐과 최소처짐의 폭이 2~3mm의 범위를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 혼입된 강섬유의 영향으로 일반 RC-시리즈의 시편보다 많은 균열의 발생으로 인해 더욱 처짐이 발생되었으므로 더 큰 연성을 보유하고 있음을 말해준다.

3.2.2 반복횟수와 변형률 관계

Fig. 9는 하중범위에 따른 시편의 반복횟수와 변형률 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 반복하중에 의한 정, 부 모멘트부의 인장철근 변형률은 재하초기에 큰 변화를 보이며, 반복횟수가 증가할수록 일정한 변동폭으로 조금씩 증가하다가 항복점에 도달했을 때 큰 증가를 나타내었다. 각 시편의 변형률의 차이는 반복횟수에 의한 것보다는 하중범위에 따라 영향을 많이 받았으며 정모멘트



(a) without steel fibrous(RC 2)



(b) with steel fibrous(SFRC 1-4)

Fig. 8 Number of cycle - deflection relation

Table 6 Results of fatigue test

| Name of beams | Recycle speed(Hz) | P_{max} (tf) | P_{min} (tf) | S_m (%) | N_u (cycle) | Failure mode |
|---------------|-------------------|----------------|----------------|-----------|---------------|--------------|
| RC2 | 5Hz | 13.2 | 1.3 | 60 | 4,490,000 | Flexure(T) |
| RC3 | | 14.3 | 1.4 | 65 | 2,179,000 | Flexure(T) |
| RC4 | | 15.4 | 1.5 | 70 | 1,670,000 | Flexure(T) |
| SFRC1-3 | | 16.3 | 1.6 | 65 | 2,639,000 | Flexure(T) |
| SFRC1-4 | | 17.5 | 1.8 | 70 | 2,577,000 | Flexure(T) |
| SFRC1-5 | | 18.8 | 1.9 | 75 | 2,148,500 | Flexure(T) |
| SFRC2-3 | | 18.3 | 1.8 | 75 | 776,897 | Flexure(T) |
| SFRC2-4 | | 19.4 | 1.9 | 80 | 750,000 | Flexure(T) |
| SFRC2-5 | | 21.9 | 2.2 | 90 | 663,220 | Flexure |
| SFRC3-3 | | 19.6 | 2.0 | 80 | 44,690 | Flexure |
| SFRC3-4 | | 18.4 | 1.8 | 75 | 443,922 | Flexure |
| SFRC3-5 | | 19.6 | 2.0 | 80 | 435,599 | Flexure |

P_{max} : maximum load, P_{min} : minimum load, S_m : percentage of static maximum load
 N_u : number of cycle to failure, T : tensile bar breaking

부위나 부모멘트 부위에서 철근이 항복하더라도 반드시 다른 쪽의 철근이 항복하는 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 또한, 항복강도에서 강섬유가 혼입되지 않은 시편인 RC-시리즈는 철근의 항복 변형율인 0.002를 상회하고 있으나 강섬유가 혼입된 시편인 SFRC-시리즈는 대부분 0.003을 넘는 변형율을 보였다. SFRC-시리즈는 혼입된 강섬유의 영향으로 인하여 철근의 변형율이 항복강도를 넘어설 때까지 피로하중을 받을 수 있도록 연성적인 구속 작용을 하는 것으로 판단된다.

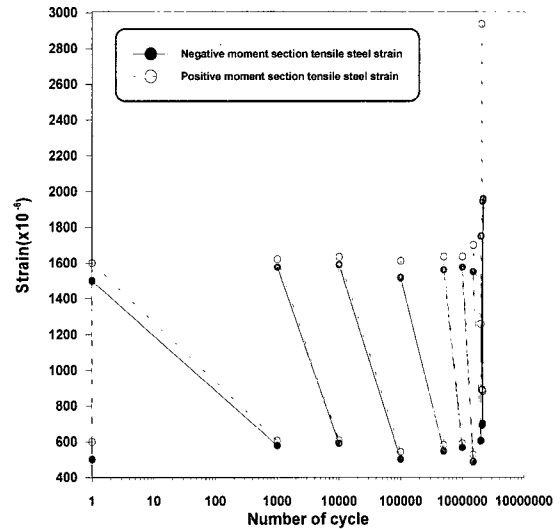
3.2.3 반복횟수에 따른 균열성장과 파괴양상

Fig. 10은 강섬유 혼입율에 따라 시편의 반복횟수 증가에 따른 균열성장과 파괴양상을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 피로실험 초기에 5회의 정적하중을 가력하였을 때 정, 부모멘트부의 순수 휨구간에서 휨균열이 발생하였으며 강섬유 혼입과 전단보강 철근의 영향으로 사인장 균열은 거의 발생하지 않았다. 대부분의 시편은 정적하중으로 인해 발생한 균열이 반복횟수가 증가함에 따라 점차로 진전하여 피로파괴의 주요인자인 주균열로 성장하였으며 정모멘트부 양쪽이 동시에 파괴되는 것이 아니라 하중이 집중되는 양경간의 한쪽 정모멘트부에서 파괴가 발생되었고 철근이 절단되는 큰 굉음과 함께 급작스럽게 파괴되었다. 부모멘트부의 파괴는 정모멘트부가 파괴된 후 그 영향으로 2차적인 파괴로 일어났으며 피로반복하중에 의한 철근의 절단은 일어나지 않았다. 또한 강섬유가 혼입되지 않은 시편인 RC-시리즈는 미세균열이 거의 없었으나 강섬유가 혼입된 SFRC-시리즈는 강섬유의 구속 작용으로 미세균열이 많이 발생되었다. 균열의 발생형태나 진전과정은 정적하중을 받는 경우와 흡사하나 균열의 개폐에서 골재와 강섬유의 맞물림 현상같은 복잡한 거동특성이 발생되었고 피로실험도중 하중을 제거하면 미세균열은 상당히 복원되는 양상을 보여주었다. 강섬유 혼입시편은 반복하중으로 인하여 철근이 파단되더라도 시편이 갑작스럽게 파괴되지 않았고 구조체로서 기능을 완전히 상실하지 않았다.

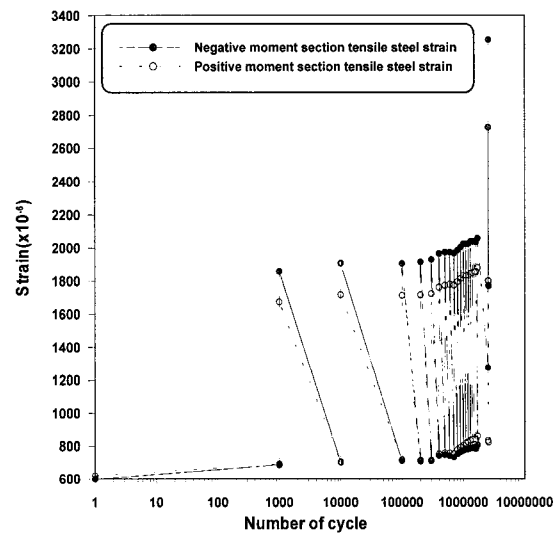
3.2.4 피로강도와 S-N곡선

강섬유 혼입율에 따른 2경간 연속보의 피로거동 특성을 실험적으로 규명하기 위한 것으로서 피로실험결과는 Table 6과 같다. Fig. 12는 RC-시리즈와 SFRC-시리즈를 각각 S-N 상관관계로 도식화한 것이다. 피로실험결과 피로수명과 피로강도 관계식은 지수형태의 함수로 나타낼 수 있다. 그리고 적용된 작용응력과 반복횟수의 관계식은 다음과 같다.

$$Y = B \times \ln(X) + A \quad (1)$$



(a) without steel fibrous(RC 3)



(b) with steel fibrous(SFRC 1-4)

Fig. 9 Number of cycle - longitudinal steel relation

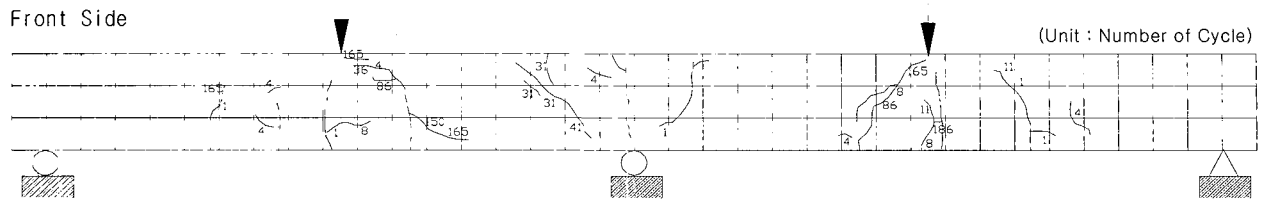
여기서, A와 B는 실험에 의하여 결정되는 상수이다. 식 (1)을 다음과 같은 형태로 바꾸어 피로실험으로부터 얻은 결과값을 정적극한하중에 대한 피로하중백분율(S)인 피로강도와 피로수명(N)을 Fig12에 나타내었다. 또한, RC-시리즈와 SFRC-시리즈의 피로수명과 피로강도 관계를 회귀분석하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

1) RC-시리즈의 피로강도 추정식

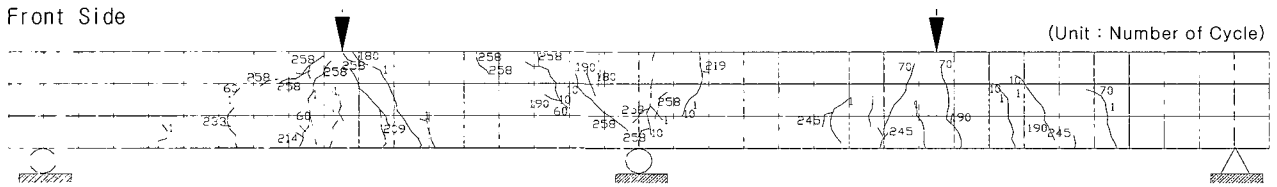
$$S = -9.4393 \times \ln(N_w) + 204.198 \quad (R^2 = 0.93) \quad (2)$$

2) SFRC-시리즈의 피로강도 추정식

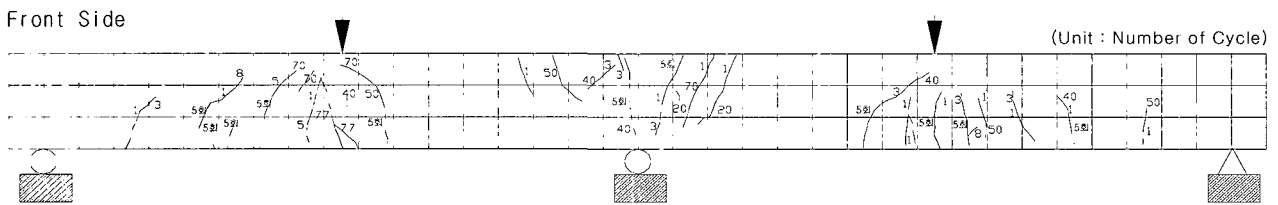
① 강섬유를 혼입한 SFRC 1의 3,4,5시편에 대한 피로강도 추정식



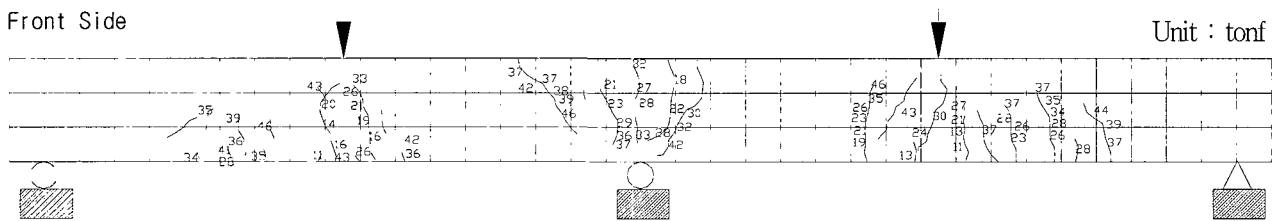
(a) RC 4



(b) SFRC 1-3



(c) SFRC 2-4



(d) SFRC 3-5

Fig. 10 Crack growth and failure mode for test beams

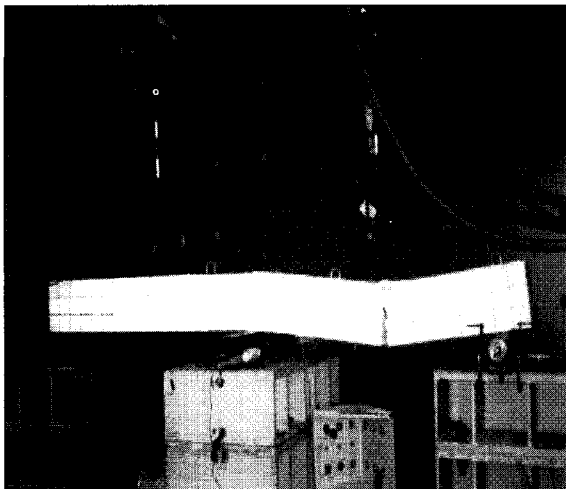


Fig. 11 Positive moment section flexure fatigue feature

$$S = -40.6274 \times \ln(N_0) + 667.606 \quad (R^2=0.835) \quad (3)$$

- ② 강섬유를 혼입한 SFRC 2의 3,4,5시편에 대한 피로강도 추정식

$$S = -91.2992 \times \ln(N_0) + 1314.08 \quad (R^2=0.986) \quad (4)$$

- ③ 강섬유를 혼입한 SFRC 1의 3,4,5시편 SFRC 2의 3,4,5시편 그리고 SFRC 3의 3,4,5시편에 대한 총괄 피로강도 추정식

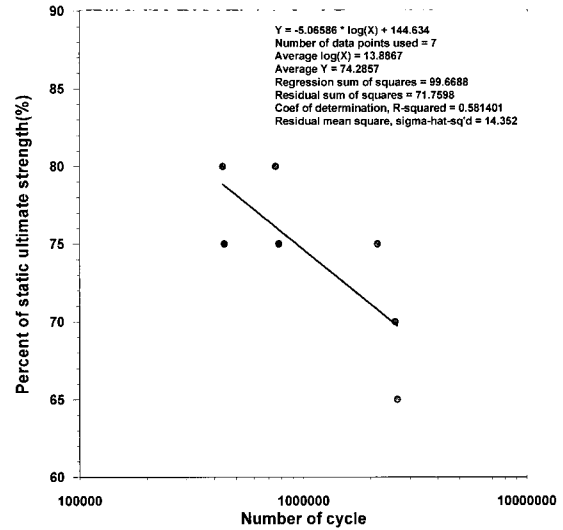
$$S = -5.06586 \times \ln(N_0) + 144.634 \quad (R^2=0.58) \quad (5)$$

본 실험에서 얻은 피로실험결과 강섬유를 혼입하지 않은 RC-시리즈의 시편은 정적극한강도의 60~70% 사이에

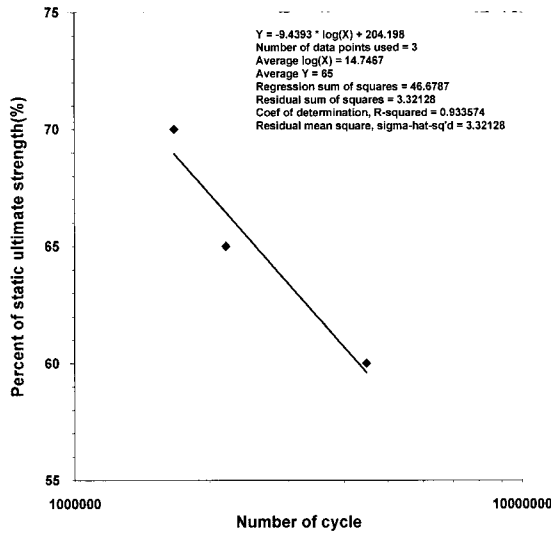
서 파괴되었으며 S-N곡선으로부터 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 73.7%, 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 67.2% 전후라고 판단된다. 또한, 강섬유를 혼입한 SFRC-시리즈의 시편은 정적극한강도의 65~85% 사이에서 파괴되었으며 S-N곡선으로부터 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 84.6%, 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 75% 전후(SFRC1의 3, 4, 5), 72% (SFRC1의 3, 4, 5, SFRC2의 3, 4, 5, SFRC3의 3, 4, 5) 라고 판단된다.

4. 결 론

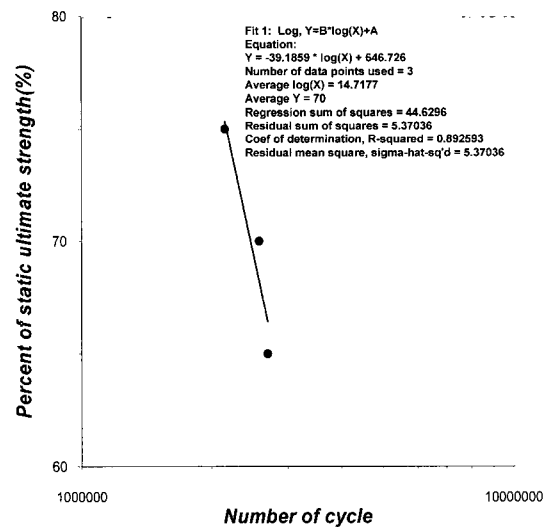
본 연구에서는 강섬유를 혼입한 2경간 연속보에 대한 기



(c) SFRC1, 2, 3-Series



(a) RC-Series



(b) SFRC1-Series

Fig. 12 S-N curve

본실험, 정적실험 및 피로실험을 통하여 피로거동을 규명한 것으로서 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 물결합재비(W/C)가 42.5%의 범위에서 강섬유 혼입율 0.75~1.25%의 경우 재령 28일의 압축강도가 431~475 kgf/cm²이었으며 강섬유 혼입율 0%의 경우 421kgf/cm²이었다. 반면 강섬유 혼입율 0.75~1.25%의 경우 압축강도에 대한 쪼갠인장강도의 비는 1/7.12~1/8.51로 나타나 강섬유의 혼입이 콘크리트의 압축강도보다는 인장강도를 크게 향상시키고 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 정적실험에 있어서 하중과 처짐의 관계는 강섬유를 0.75% 혼입한 시편이 혼입되지 않은 시편보다 파괴시 최대 2.5배 정도 크게 발생하였으나 강섬유 혼입율의 증가에 따라 처짐이 증가하지는 않았다.
- 3) 정적실험에 있어서 하중과 변형률 관계는 강섬유가 혼입되지 않은 시편은 콘크리트의 취성적 성질로 인해 휨균열 발생 후 낮은 하중에서 철근의 항복강도에 이르러 큰 변형율을 나타냈으나 강섬유가 혼입된 시편은 철근의 항복강도가 시편의 극한강도에 거의 근접하여 큰 변형율이 발생하였다.
- 4) 정적실험에 있어서 하중증가에 따른 파괴양상은 강섬유가 혼입된 시편은 휨균열의 간격이 강섬유를 혼입하지 않은 시편보다 줄어들고, 미세균열의 수가 증가하였으며, 철근이 항복한 이후에도 강섬유로 인하여 어느정도 균열진전 제어의 효과가 있었으며 시편이 파단될 때 강섬유 자체가 파단 되는 것이 아닌 뿔힘에 의해 파괴되었다.
- 5) 피로실험 결과 반복횟수와 중앙 처짐과의 관계는 강섬유를 혼입하지 않은 시편은 최대처짐과 최소처짐의 폭

이 2mm를 벗어나지 못하였으나 강섬유를 혼입한 시편은 최대처짐과 최소처짐의 폭이 2~3mm의 범위를 나타내었다.

- 6) 피로실험 결과 반복횟수에 따른 파괴양상은 강섬유를 혼입한 시편은 반복하중으로 인하여 철근이 파단되더라도 급작스럽게 파괴되지 않았고 강섬유의 교량상황으로 구조체의 기능을 완전히 상실하지 않았다.
- 7) 피로실험 결과 강섬유를 혼입하지 않은 시편은 정적극한강도의 60~70% 사이에서 파괴되었으며 S-N곡선으로부터 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 73.7%, 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 67.2% 전후라고 판단되며, 강섬유를 혼입한 시편은 정적 극한강도의 65~85% 사이에서 파괴되었으며 S-N곡선으로부터 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 84.6%, 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 75% 전후 (SFRC1의 3, 4, 5), 72% (SFRC1의 3, 4, 5, SFRC2의 3, 4, 5, SFRC3의 3, 4, 5) 라고 판단된다.
- 8) 강섬유를 0.75% 혼입한 SFRC 1의 3,4,5시편에 대한 피로강도 추정식

$$S = -40.6274 \times \ln(N_f) + 667.606$$

$$(R^2=0.835)$$

강섬유를 혼입한 SFRC 1의 3,4,5시편 SFRC 2의 3,4,5시편 그리고 SFRC 3의 3,4,5시편에 대한 총괄 피로강도 추정식

$$S = -5.06586 \times \ln(N_f) + 144.634$$

$$(R^2=0.58)$$

- 9) 결론 7과 8에서와 같이 본 연구에서 실험한 모든 부재에 다음과 같이 일반화 할 수 있다. 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 72%이고 일반적인 피로강도 추정식은 다음과 같다.

$$S = -5.06586 \times \ln(N_f) + 144.634$$

$$(R^2=0.58)$$

- 10) 강섬유를 혼입한 2경간 연속보의 정적, 피로실험을

통하여 콘크리트의 취성적 거동이 연성적 변화하는 것을 확인 할 수 있었으며 안정성 및 사용성 측면에서 반복횟수증가에 따른 처짐 및 변형도를 정확히 분석함으로써 본 연구결과를 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 원광대학교의 교비지원에 의해 연구되었음.

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 544, "Design Constructions for Steel Fiber Reinforced Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol.35, No.5, Sep. 1998, pp.536-580.
3. ASTM committee, "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete," C1116-91 pp.578-582.
4. Holmen, J.O., "Fatigue of Concrete by Constant and Amplitude Loading," *Fatigue of Concrete*, SP-41, ACI, 1982, 401pp.
5. 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.
6. Williamson, G.R., "Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete," *Fiber Reinforced Concrete*, ACI SP-44, 1974, pp.195-208.
7. 광계환, "강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트보의 거동 및 보수에 관한 연구", 1998년 건설교통부.

요 약

최근 콘크리트 구조물이 점차 대형화, 고층화, 장대화 및 특수화 됨에 따라 강섬유 콘크리트의 적용이 요구되고 있다. 본 연구에서는 반복하중을 받는 강섬유를 혼입한 2경간 연속보에 대한 실험적 연구를 수행하여 피로하중에 의한 강섬유 혼입율(0%, 0.75%, 1.00%, 1.25%)에 따른 피로강도를 규명하고자 하였다. 정적실험을 통하여 극한하중, 초기 휨균열하중 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. 피로실험 결과 강섬유를 혼입하지 않은 2경간 연속보는 정적극한강도의 60~70%에서 파괴되었고 S-N곡선으로부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 67.2% 전후임을 확인 할 수 있었다. 또한, 강섬유를 혼입한 2경간 연속보는 정적극한강도의 65~85%에서 파괴되었고 S-N곡선으로부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 71.7%전후임을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 강섬유 콘크리트, 2경간 연속보, 강섬유 혼입율, 피로실험, S-N 곡선