

강섬유를 혼입한 철근 콘크리트 부재의 전단거동 및 전단해석에 관한 연구

Shear Behavior and Shear Analysis of Reinforced Concrete Members Containing Steel Fibers

오 병 환* 임 동 환** 이 형 준**
Oh, Byung Hwan Lim, Dong Hwan, Lee, Hyung Joon

요 약

본 논문에서는 강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재의 전단거동에 관한 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 강섬유가 혼입된 구조부재를 제작하여 실험을 수행하여 강섬유의 전단보강 효과를 규명하였으며, 부재의 연성, 극한전단강도 및 초기균열 전단강도 등을 모두 만족하는 최적의 강섬유 혼입량 및 전단철근 배근량을 제안하였다. 본 실험으로부터 강섬유의 혼입으로 인하여 연성의 증가뿐 아니라, 초기균열강도는 크게 향상되었으며, 극한전단강도 역시 만족할만큼 증가함을 알 수 있었다. 위의 실험결과로 부터 강섬유 혼입량(체적비) 1%, 시방서에서 규정하는 전단철근 필요량의 75%가 가장 만족스러운 조합임을 알 수 있었다. 본 논문에서는 강섬유가 혼입된 철근 콘크리트 부재의 극한 전단강도 예측기법이 제시되었으며, 앞으로 강섬유 콘크리트는 연성을 필요로 하는 내진구조물등에 효율적으로 이용될 것으로 사료된다.

Abstract

An investigation on the behavior of reinforced concrete beams containing steel fibers subjected to predominant shear is presented. A total of 9 beams have been tested to investigate the influence of fiber reinforcement on the mechanical behavior of reinforced concrete beams in shear. The major test variables were the amount of steel fibers and the volume of shear stirrups. The fiber volumes were varied from 0% to 2% by volume and the stirrup amounts also varied. The test results show that the first cracking shear strength increases significantly as fiber content increases and the improvement in ultimate shear is also achieved. The modes of failure changed from shear to flexural type when the volume fraction of fibers exceeds one percent. This means that fiber

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료

• 본 논문에 대한 토의를 1993년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 1994년 3월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

reinforcement increases shear capacity greatly. The ductility is also enhanced remarkably with the addition of fibers. The present study indicates that fiber reinforcement can help reduce shear stirrups and that the combination of fibers and stirrups may accomplish strength requirement as well as ductility requirement. An analytical method to predict the shear strength of reinforced concrete beams containing steel fibers is proposed. The proposed method will allow more realistic shear analysis of reinforced concrete structural members containing steel fibers.

Keywords : Fiber reinforced concrete, steel fibers, shear behavior, shear analysis, cracking shear strength, ultimate shear strength, ductility.

1. 서 론

콘크리트의 인장 및 전단저항 능력의 증대와 국부적 균열의 생성 및 성장을 억제하는 등의 역학적 성질을 개선 보강하기 위해 불연속적이거나, 짧은 섬유질 재료를 콘크리트속에 분산시켜 넣은 것을 섬유보강 콘크리트 혹은 섬유콘크리트(fiber reinforced concrete)라 한다. 섬유보강의 개념은 섬유에 하중의 일부분이 전달된 상황을 생각하여 구조체의 변형을 고려한다는 것이다. 섬유는 균열선단에 죄는 힘(pinching force)을 가함으로써 진전하는 균열을 지연시키며, 늦은 속도의 균열전파를 유도한다. 그리하여 보강하지 않은 콘크리트보다 몇배의 높은 극한 균열변형(Ultimate cracking strain)을 가지게 된다.

1960년대에 미국의 Romualdi와 Baston은 강섬유로 보강된 콘크리트의 인장시험을 통하여 콘크리트의 인성과 인장강도가 현저히 개선된다는 사실을 발표하였다. 또한 초기 균열 인장강도는 섬유의 기하학적 간격(geometric spacing)에 역비례하고, 짧은 섬유를 직접 배합함으로써 초기 균열강도의 증진을 가져온다는 균열제어개념(crack arrest mechanism)을 제안하였다. Henager와 Doherty는 극한강도법에 근거하여, 부착강도, 섬유강도, 섬유길이, 형상비(aspect ratio) 및 섬유 혼입량을 고려한 이론적 방법을 제시하였다. 1980년대에 들어와서는 섬유의 기본적 강도특성뿐 아니라 철근 콘크리트부재에 섬유를 혼입한 효과에 대해서 실험적 이론적 연구가 활발히 진행되고 있다. Kormeling은 철근콘크리트보에 강섬유를 혼입하여 정적 및 피로시험 특성에 대한 섬유혼입

효과를 조사하였고, Swamy & Al-Ta'an은 휨거동에 대한 효과를 실험 및 이론을 통하여 분석하였다.

본 연구에서는 중요한 건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트의 특성을 개선하기 위하여 철근 콘크리트에 강섬유를 혼입한 부재에 대한 전단시험을 통하여 부재의 역학적 거동특성에 관한 섬유의 보강효과를 규명하고자 한다. 섬유의 혼입량과 전단철근량에 따른 섬유의 전단철근 대체효과를 알아보기 위하여 섬유혼입량과 전단철근비를 변화시켜 가며 실험을 수행하며, 높은 극한 전단강도와 초기 균열강도를 가지는 최적의 전단철근량과 섬유량을 분석 제안하고자 한다. 또한 균열간격, 균열폭, 스테럽의 응력 및 인장철근의 응력을 측정 분석하며 섬유혼입량에 따른 파괴양상의 변화를 관측한다. 이러한 결과의 분석에 의하여 섬유콘크리트의 구조적 이용가능성을 제시하고자 한다.

2. 섬유 콘크리트보의 전단거동 실험

2.1 실험개요

2.1.1 실험재료

(1) 콘크리트

콘크리트는 물-시멘트비(w/c)=0.40, 슬럼프값을 12cm로 하여 보통 콘크리트로서 재령 28일 압축강도(σ_{ck})가 350kg/cm²이 되도록 배합설계하였다. 시멘트는 제1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 조립률 2.21, 비중 2.66인 것을 사용하였다. 또한 굵은 골재는 조립률 6.

19, 비중 2.64, 최대치수 10mm인 것을 사용하였다. 배합은 단위시멘트량 450kg/m³, 물 180kg/m³, 잔골재 707kg/m³, 굵은골재 1060kg/m³로 하였다.

(2) 강섬유 및 철근

본 실험에서 콘크리트 보강재로 사용한 강섬유는 단면이 원형인 강선을 일정한 길이로 공장제작하여 사용하였다. 강섬유는 직경 $d_f=0.7\text{mm}$, 길이 $l_f=40\text{mm}$ 이고, 형상비가 57인 직선섬유(straight fiber)이다. 강섬유에 대해 재료시험을 실시한 결과 항복강도는 1303 MPa이었고, 탄성계수(E_f)는 $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 였다.

섬유의 혼입량에 따른 섬유보강 효과를 알아보기 위해서 실험변수는 섬유혼입량으로 하였으며, 이때 섬유혼입률은 0.0%, 1.0%, 2.0%로 하였다. 인장철근 및 압축철근은 SD40 철근을 사용하였고 전단철근은 가공상의 이유 등으로 보통강도의 철근을 사용하는 것이 일반적이므로 SD30 철근을 사용하였다. 각 철근에 대한 재료 시험결과, 각 철근의 항복 강도는 모두 규정강도를 초과하였다. SD40 철근의 경우 항복강도는 420MPa이고, SD30 철근은 359MPa이었으며, 또한 철근의 탄성계수(E_s)는 $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 였다.

2.1.2 실험부재의 설계

실험부재의 단면 및 지간은 콘크리트 표준시방서의 규정에 따라서 선정하였으며, 실험부재는 복철근보로 하여 모두 9개를 제작하였다. 부재의 단면형상은 모두 직사각형으로서 $h=18\text{cm}$, $b=10\text{cm}$, $d=15\text{cm}$, 압축철근의 위치 $d'=3\text{cm}$ 인 복철근보이고, 부재의 총 길이는 170cm이며 지간길이는 $L=140\text{cm}$ 이다.

전단철근량의 변화에 따른 섬유의 혼입효과를 알아보기 위해서 실험부재의 변수로는 전단철근량을 변화시켰다. 전단철근의 양은 설계시방서상의 필요량의 0%, 50%, 75%, 100%로 배근하였으며, 섬유혼입률을 0%, 1%, 2%로 변화시켰다. 인장철근은 $A_s=3.972\text{cm}^2(2 \times D16)$, 압축철근은 $A'_s=1.426\text{cm}^2(2 \times D10)$ 로 하였으며 인장 및 압축 철근은 SD40의 철근을 사용하였다. 각 부재의 단면형상, 게이지 부착위치는 Fig.1과 같다.

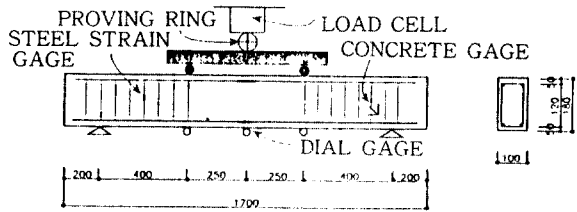


Fig. 1 Setting of test beam & Locations of measuring sensors

2.2 실험부재의 제작 및 양생

실험부재의 제작시 거푸집은 두께 12mm인 합판으로 만들었으며, 콘크리트 타설부재의 성형을 돕기 위해서 거푸집을 각목으로 보강하였다. 콘크리트는 콘크리트 믹서를 이용하여 시멘트, 굵은골재, 잔골재를 혼합한 후 강섬유를 골고루 분포시키면서 혼합하였다. 또한 붓으로 충분한 다짐을 하면서 콘크리트를 타설하였고, 양생은 부재를 거적으로 덮어 살수를 하면서 습윤양생을 실시하였다.

섬유 콘크리트의 기본적 강도특성을 알아보기 위해서 강도시험용 시편을 제작하였으며, 압축강도 및 활열인장강도 시험용으로 지름 10cm, 높이 20cm인 원통형 공시체(cylinder mould)를 각 부재당 4개씩 제작하였고, 휨강도 시험용으로 단면 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$, 길이 50cm인 보공시체(beam mould)를 각 부재당 2개씩 제작하였다. 강도시험용 공시체의 양생은 수중양생과 실험부재의 양생 조건과 같은 습윤양생을 실시하였다. 부재제작 후 28일 양생을 한 다음 부재 및 공시체에 대한 휨시험 및 기본 강도시험을 시행하였다.

2.3 실험방법 및 측정

2.3.1 재하방법

실험부재의 지지조건은 단순틀보로 하였으며, 실험부재에 대한 재하는 양쪽 지점에서 40cm 떨어진 점에 4-점 재하방법(4-point bending test)으로 연직하중을 가하였다. 부재의 재하부 콘크리트의 지압파손을 막고, 편심재하를 방지하기 위하여 재하점의 콘크리트에 폭 14cm의 철판을 두었

다.

하중의 재하는 극한하중에 도달할 때까지 20~25회정도 단계적으로 실시하였다. 초기균열이 생길 때까지는 0.25ton씩 증가하면서 재하하였고, 균열이 생긴 후 사용하중 단계에서는 0.50ton씩 하중을 증가시켰다. 또한 극한하중 근처에서는 0.25ton씩 증가시키면서 재하하였다.

2.3.2 측정 및 결과기록

각 하중재하 단계마다 중앙점, 하중재하점과 시간의 1/4점의 처짐, 균열형상, 균열폭, 철근과 콘크리트의 변형도를 측정하였다.

(1) 처짐

실험부재 지점에서 35cm지점 및 하중재하점에 0.01mm 정도의 다이알 게이지를 설치하여 각 하중단계마다 처짐을 측정하였고, 이를 토대로 하여 각 부재의 하중-처짐 곡선을 얻었다.

(2) 철근의 변형도

인장, 압축철근의 변형도는 철근표면에 5mm 부착식 전기저항 스트레인 게이지(strain gage)를 부착하여 방수처리한 후 각 하중단계마다 측정하였으며, 전단철근의 경우는 지점으로부터 20cm 및 40cm 떨어진 곳에 위치한 전단철근의 중앙부분에 주 철근과 같은 방법으로 스트레인 게이지를 부착한 후 각 하중단계마다 전단철근의 변형도를 자동으로 측정하였다.

(3) 균열폭

균열폭은 대표적인 몇개의 균열에 대하여 最小讀置 0.01mm인 광학 균열측정기구(eye gage)로 각 하중단계마다 측정하였다. 측정위치는 휨구간 및 전단구간이며, 대표적인 균열에 대해 인장측 연단에서 균열폭을 측정하였다.

(4) 균열형상

각 실험부재에 흰색 페인트를 칠하여 균열이 발생한 후 각 하중단계마다 균열의 진행을 표시하여 균열형상 및 균열간격을 측정하였고, 부재가 파괴에 이르기 전에 균열형상을 트레이싱 페이퍼에 옮겨 그렸다.

3. 섬유콘크리트 보의 전단거동 실험결과 및 분석

3.1 기본강도시험

기본강도시험은 시편제작 후 부재시험과 같이 재령 28일이 되었을 때 수행하였으며, 이 시편에 대한 재료시험결과는 Table 1과 같다.

(1) 압축강도 특성

섬유 콘크리트는 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도는 거의 선형적으로 증가하였으며, 섬유 혼입률에 따른 강도의 증가율은 Fig.2에 나타내었다. 이때 압축강도의 증가율은 인장강도의 증가율보다 적었고, 섬유혼입률이 2%일 때 압축강도의 증가율이 25%정도였다. 이와 같은 강도의 증가는 강섬유의 균열 억제작용으로 인하여 일어나는 것으로 사료된다.

(2) 휨강도 특성

무근 콘크리트는 최대하중에 도달한 후 급속한 파괴가 일어나는데 반하여 섬유를 혼입한 경우 균열이 상당히 생긴후에도 섬유의 연결(bridging) 작용으로 인하여 파괴가 급격히 일어나지 않고 서서히 파괴되는 현상을 보여주고 있다. 섬유 혼입률이 2.0%일 때 휨강도의 증진은 약 55%로서 압축강도의 증가율보다는 크고 할열 인장강도의 증가율보다는 작았다.

(3) 할열 인장강도의 특성

섬유 콘크리트의 할열 인장강도는 섬유 혼입률이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였고, 섬유혼입률 2.0%일 때 할열인장강도는 약 2배 증가하였다. Fig.2로부터 할열인장강도의 증가율이 휨강도나 압축강도의 증가율보다 훨씬 큼을 알 수 있고, 이와 같은 결과는 콘크리트에 대한 섬유의 보강은 압축강도보다는 인장강도를 크게 개선

Table 1 Measured strength of concrete

Strength Fiber content	Compressive strength f'_{ca} (MPa)	Splitting tensile strength f'_{st} (MPa)	Flexural Strength f'_{ft} (MPa)
0.0 %	34.0	2.50	7.14
1.0 %	38.69	4.00	8.71
2.0 %	42.40	5.10	11.07

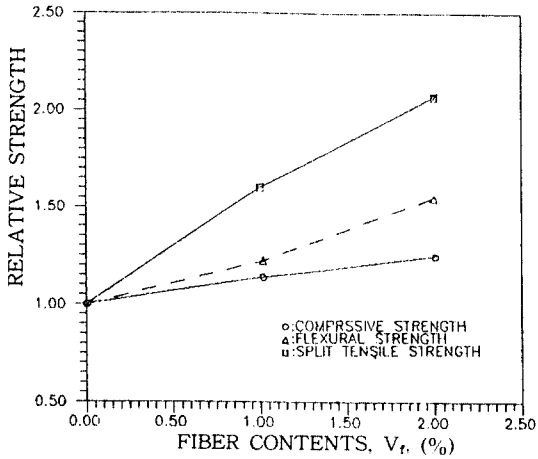


Fig. 2 Variation of each strength as a function of fiber contents

함을 나타낸다. 또, 활열인장강도의 증가율이 휨인장강도 증가율보다 큰 것은 활열인장의 경우가 휨인장보다도 인장을 받는 영역이 상대적으로 많기 때문에 섬유효과가 활열인장에서 더 크게 나타나는 것으로 사료된다.

3.2 전단거동의 특성

3.2.1 하중-처짐관계 특성

Fig.3에서 Fig.5까지에서 볼 수 있듯이 초기균열이 발생하기 전까지는 하중-처짐곡선은 선형으로 나타나며, 균열이 발생한 이후에도 섬유만으로

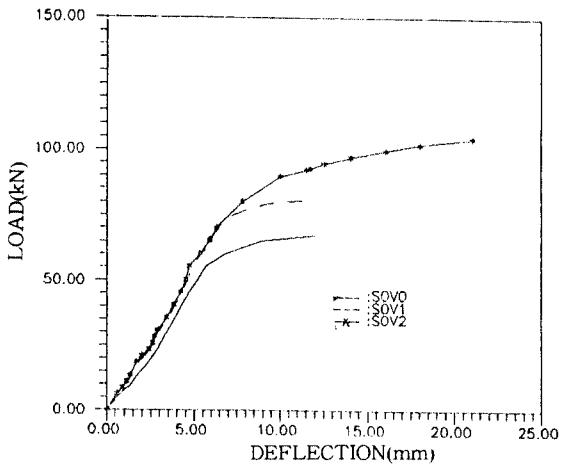


Fig. 3 Load-deflection curves for beams without stirrups

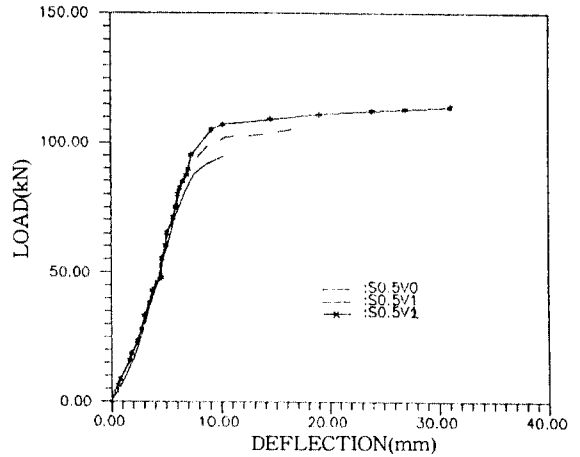


Fig. 4 Load-deflection curves for beams with 50% stirrups

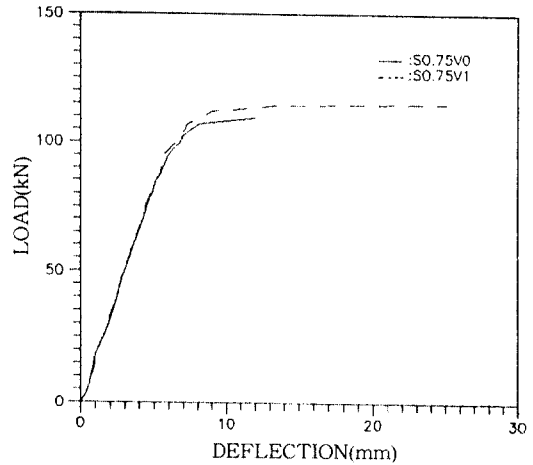


Fig. 5 Load-deflection curves for beams with 75% stirrups

보강된 콘크리트보와 섬유, 전단철근이 동시에 보강된 콘크리트보가 비선형 거동을 가지는 하중-처짐관계 특성을 나타냄을 알 수 있다. 또한 같은 양의 전단철근이 보강되었을 시 섬유혼입량의 증가에 따라 극한 전단강도가 증가하고 연성이 좋아짐을 알 수 있다.

3.2.2 파괴양상

파괴양상(modes of failure)은 휨파괴(flexural failure)와 전단파괴(shear failure)로 구분될 수 있다. 휨파괴는 인장부위(tension face)에서 휨균열

이 발생하며 콘크리트의 압축단을 관통하는 파괴 양상을 말하며, 전단파괴는 보의 전단구간(shear span)에서 과대한 사인장 균열의 발생으로 인한 파괴 양상이다.

Fig.6에서 알 수 있듯이, 섬유 혼입량(1%미만)이 혼입되었을 때 보의 극한 상태에서 급격하게 전단파괴를 일으킨다. 그러나 1%이상의 섬유가 혼입되었을 때 파괴양상은 전단파괴에서 휨파괴로 점진적으로 변화한다는 사실을 알 수 있었으며, 이것은 Narayanan과 Mansur의 실험결과와 일치하고 있다. 이러한 사실은 강섬유가 전단파괴의 억제에 있어 좋은 효과를 보이고 있음을 말해 준다.

3.2.3 전단강도

(1) 균열전단강도(Cracking Shear Strength)

철근 콘크리트보에 섬유를 혼입하였을 때 가장 현저한 효과는 초기 균열전단강도의 증대이다. Fig.6에서 알 수 있듯이 섬유를 혼입한 보의 섬유를 혼입하지 않은 보에 비하여 상대적으로 높은 초기 균열강도를 가짐을 알 수 있다.

섬유와 전단철근을 동시에 혼입한 보에서도 마찬가지로 전단철근만을 배근한 경우보다 거의 2배의 높은 초기 균열강도를 가짐을 볼 수 있다.

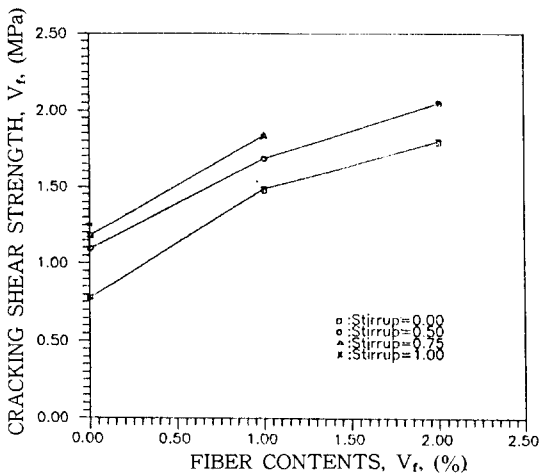


Fig. 6 Cracking shear strength vs. fiber contents

(2) 극한전단강도(Ultimate Shear Strength)

Fig.7에서 볼 수 있듯이 전단철근을 보강하지 않은 보의 경우, 섬유 혼입량을 증가시키기에 따라 보에 극한 저항능력이 크게 증가하고 있다. 전단철근이 있는 경우에도 섬유 혼입에 따라 전단강도가 증가하고 있으나, 그 효과는 전단철근이 없는 경우보다 작게 나타나고 있다. 즉, 전단철근의 일부와 섬유를 동시에 함유한 보의 전단철근만을 완전히 보강한 보와 거의 비슷한 극한전단강도를 가질 수 있음을 보여주고 있다. 본 실험에서는 필요한 전단철근량의 75%와 섬유량 1%를 혼입한 경우나, 필요한 전단철근량의 50%와 섬유량 2%를 혼입한 경우 섬유혼입없이 전단철근량만 100% 설치한 경우와 거의 같은 극한전단강도를 나타내고 있으며, 연성(ductility)은 오히려 더욱 크게 나타나 효율적인 것을 보여주고 있다.

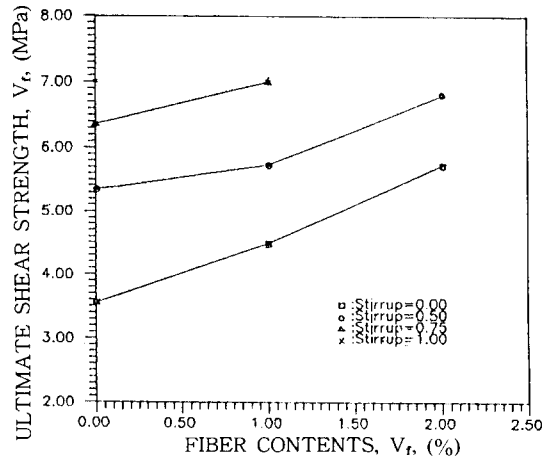


Fig. 7 Ultimate shear strength vs. fiber contents

3.3 균열폭 및 균열간격

철근 콘크리트 부재의 균열폭은 철근의 응력과 전반적으로 선형의 관계가 있다는 사실은 기존의 여러 연구에서 밝혀져 왔다. 본 실험에서 얻은 균열폭과 철근응력의 변화도 거의 선형의 관계를 보였고, Fig.8~Fig.9에 이들의 관계를 도시하였다. 여기서 철근의 응력은 측정된 철근의 변형도에 철근의 탄성계수(E_s)를 곱하여 얻었다.

이들 그림에서 보듯이 섬유를 혼입한 부재는 같은 하중수준 (loading level)에서 균열폭과 균열 발생수는 상당히 감소됨을 알 수 있다.

섬유혼입량과 평균 균열간격 (average crack spacing)의 관계는 Fig.10과 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 섬유를 혼입한 부재의 경우가 균열간격이 작게 나타났으며, 섬유혼입률이 증가할수록 균열간격이 더 많이 감소하였다. 이것은 섬유를 혼입한 부재에서는 균열폭이 작고 미세균열이 분산되어 발생한다는 것을 말해주고 있다. 섬유를 혼입함으로써 균열폭 및 균열간격이 감소하는 것은 섬유의 균열성장 억제작용으로 인해 균열의

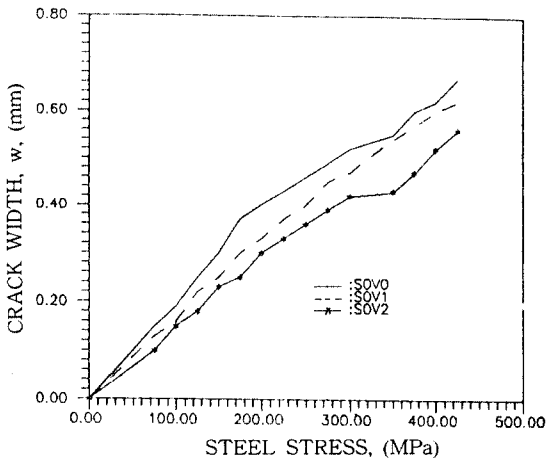


Fig. 8 Crack width vs. steel stress curves for beams without stirrups

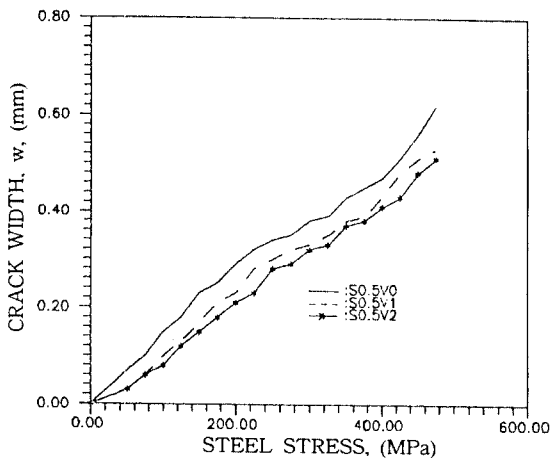


Fig. 9 Crack width vs. steel stress curves for beams with 50% stirrups

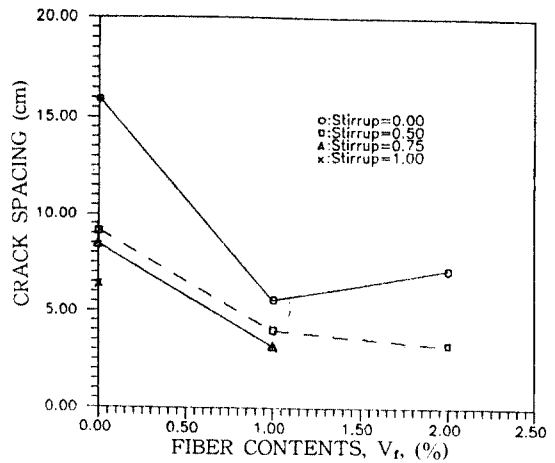


Fig. 10 Crack spacing vs. fiber contents

확산이 방지되어 새로운 미세균열 (micro crack) 이 생성되기 때문이다. 일반적으로 철근 콘크리트 구조물에서 균열은 철근의 부식등과 관계되기 때문에 균열폭의 제한은 중요하다. 그러므로 섬유의 혼입은 구조물의 균열폭을 억제하는데 유효한 것으로 사료된다.

4. 섬유 콘크리트 부재의 전단해석

Fig.11은 단순지지 섬유보강 콘크리트 부재의 전단구간 자유물체도 (free body diagram)로서, 전체 전단력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

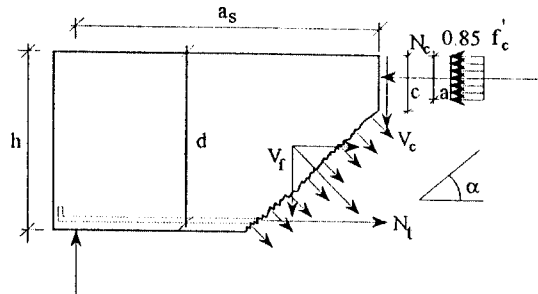


Fig. 11 Free body diagram of part of shear span of a simply supported fiber reinforced concrete beam

$$V = V_c + V_a + V_d + V_f \quad (1)$$

여기서, $V_c =$ 압축부 콘크리트에서 저항하는 전단력, $V_a =$ 골재 맞물림 힘(Interlocking force), $V_d =$ dowel action에 의한 힘, $V_f =$ 섬유 뽑힘 힘의 수직분력(vertical components of the fiber pull-out forces along the inclined crack)이다.

만약 전단철근이 전혀 보강되지 않은 콘크리트의 전단저항 능력을 생각한다면 극한 전단강도식은 다음과 같이 쓸 수 있다.(Zsutty, Placas & Regan)

$$V_{uc} = (10\rho f'_c d/a_s)^{1/3} \text{ for } a_s/d > 2.5 \quad (2)$$

$$V_{uc} = (160\rho f'_c)^{1/3} (d/a_s)^{4/3} \text{ for } a_s/d < 2.5 \quad (3)$$

여기서, $\rho =$ 인장 철근비, $f'_c =$ 콘크리트의 압축강도(Mpa), $d =$ 보의 유효깊이(m), $a_s =$ shear span(m)이다.

그러나 본 연구에서는 전단철근이 보강된 콘크리트 부재의 전단거동을 연구하기 위한 것이므로 스테럽의 전단보강 효과가 당연히 규명되어야 하며, 따라서 스테럽이 함유된 극한전단 강도식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{uc} = (10\rho f'_c d/a_s)^{1/3} + \frac{A_v f_y d}{s} \text{ for } a_s/d > 2.5 \quad (4)$$

$$V_{uc} = (160\rho f'_c)^{1/3} (d/a_s)^{4/3} + \frac{A_v f_y d}{s} \text{ for } a_s/d < 2.5 \quad (5)$$

여기서, $A_v =$ 스테럽의 단면적, $f_y =$ 스테럽의 인장강도, $s =$ 스테럽의 배근간격d이다.

또한 강섬유의 전단저항 능력을 규명하기 위해서는 먼저 중립축이 계산되어야 하며, 또한 외력의 의한 모멘트($V_u \cdot a_s$)는 내력 저항 모멘트(M_u)와 같아야 하며 이것을 표시하면 다음 식과 같다.

$$M_u = V_u a_s = v_{uc} b d a_s = 0.85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_y (d - d') \text{ for } a_s/d > 2.5 \quad (6)$$

식(6)으로 부터 응력사각형의 깊이 a (stress

block depth)가 결정되며, 중립축의 깊이 c 는 $c = a/\beta$ 로 계산되어 진다. 또한 Fig.11에서 사인장 균열길이는 $(h-c)/\sin\alpha$ 로 표시할 수 있으며, 강섬유가 부재의 전단저항에 기여하는 면적은 $b(h-c)/\sin\alpha$ 가 된다. 또한 단위 균열면적(unit area of the crack)은 다음과 같다.(by Hannant)

$$N = 0.5 v_f / (\pi r_f^2) \quad (7)$$

여기서, v_f : 섬유의 체적비, r_f : 섬유의 반경이다.

섬유의 뽑힘현상(fiber pull-out)으로 인하여 섬유 의 부착길이는 작아지며, 섬유의 평균부착길이는 일반적으로 $l_f/4$ 로 알려져 있다. 따라서 섬유의 평균뽑힘 강도(average pull-out force)는 다음과 같다.

$$f = \tau \pi d_f l_f / 4 \quad (8)$$

여기서, $\tau =$ 평균 부착강도이다.

따라서, 파괴시에 섬유에 의해 지지되는 단위 균열면적(unit area of crack)당 극한 전단 강도는 다음과 같다.

$$\sigma_{cu} = N f = N \tau \pi d_f l_f / 4 \quad (9)$$

식(7)을 식(9)에 대입하면 극한 전단 강도(σ_{cu})에 대한 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\sigma_{cu} = 0.5 \tau v_f l_f / d_f \quad (10)$$

따라서 균열에 수직한 섬유의 전체 강도는 다음과 같다.

$$F = \sigma_{cu} b (h-c) / \sin\alpha \quad (11)$$

위식에서 전체강도의 수직성분이 섬유혼입으로 인한 전단강도의 증가량이 된다.

$$V = F \sin\alpha = \sigma_{cu} b (h-c) \quad (12)$$

따라서 강섬유 보강에 의한 단위응력(unit stress)은 다음과 같다.

$$V_{uf} = V/bd = \sigma_{cu} (h-c)/d \quad (13)$$

그러므로 섬유보강 콘크리트 부재의 전체전단 강도는 위에서 계산된 식(4~5)의 V_{uc} 와 식(13)의 V_{uf} 를 합하면 되며 다음과 같다.

Table 2 Beam details and test results

Id. of Beam	Stirrup		Fibers		f'_{ck} (Mpa)	f_{sp} (Mpa)	V_{r0} (Mpa)	V_{uo} (Mpa)	V_{up} (Mpa)
	Spacing(mm)	ρ (%)	l/d	ρ (%)					
S0.00V0	--	0		0	34.00	2.50	0.78	3.56	3.38
S0.50V0	8.0	50		0	34.00	2.50	1.09	5.35	5.34
S0.75V0	6.0	75		0	34.00	2.50	1.18	6.36	6.30
S1.00V0	4.0	100		0	34.00	2.50	1.25	7.00	7.77
S0.00V1	--	0		1	38.69	4.00	1.49	4.49	4.98
S0.50V1	8.0	50		1	38.69	4.00	1.69	5.73	7.00
S0.75V1	6.0	75		1	38.69	4.00	1.84	7.00	7.70
S0.00V2	--	0		2	42.40	5.10	1.81	5.73	6.36
S0.50V2	8.0	50		2	42.40	5.10	2.06	6.80	8.50

* f'_{ck} =compressive strength, f_{sp} =splitting tensile strength, V_{r0} =cracking shear strength, V_{uo} =observed ultimate shear strength, V_{up} =predicted ultimate shear strength.

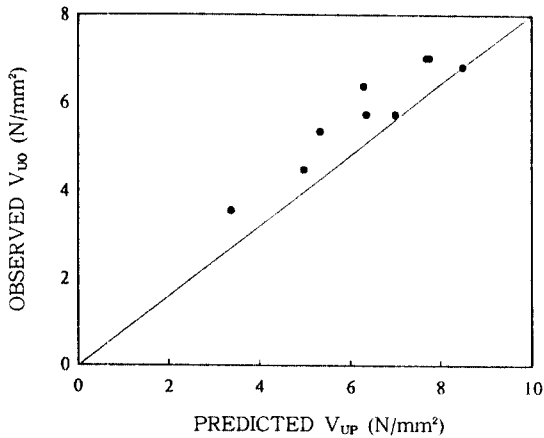


Fig. 12 Relations of observed ultimate shear strength vs. predicted ultimate shear strength

$$V_u = V_{uc} + V_{uf} \quad (14)$$

Table 2는 위의 해석과정에 의해서 계산된 극한 전단강도와 실험에서 관측된 극한전단 강도를 비교하여 나타낸 표로서 실험치와 이론치가 잘 일치함을 보이고 있다. 이론치에 대한 실험치비의 평균은 0.92, 표준편차 0.08 그리고 분산계수는 8.7%로 나타났다. Fig.12는 위의 결과를 도시한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재의 전단실험을 통해서 부재의 전단철근량과 섬유혼입량의 변화에 따른 전단강도의 변화 효과

를 알아 보았다. 실험의 결과를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 콘크리트에 섬유를 혼입하면 압축강도, 휨강도, 인장강도 및 연성이 증가하며, 이 때 인장강도가 가장 많이 증가하므로 섬유의 혼입은 콘크리트의 인장거동을 크게 개선한다.
2. 섬유혼입량의 증가에 따라 초기균열 강도는 전단철근만 배근되었을 때보다 2배 이상 현저히 증가된다.
3. 섬유혼입량의 증가에 따라 파괴양상은 전단 파괴에서 휨파괴로 점진적으로 변화하며 그 적정치는 1%로 나타났다. 이것은 섬유보강으로 인하여 전단강도가 증대되기 때문이며, 강섬유는 전단파괴를 억제하는데 매우 유용하다.
4. 섬유혼입은 인장응력을 적절히 재분배하여 압축단의 균열전파를 억제하고 균열폭 균열간격을 감소시킨다.
5. 섬유보강 콘크리트는 섬유혼입량의 증가로 높은 연성을 나타내며 강섬유와 전단철근을 적절히 혼입하였을 때 전단철근만 배근된 부재보다 높은 연성과 강성을 지닌다.
6. 전단철근량의 일부분이 섬유에 의하여 대체될 수 있으며 초기균열 전단강도와 극한 전단강도를 고려한 최적의 전단철근량은 현행 설계량의 75%, 섬유혼입률은 1%임을 실험을 통해서 분석 제안하였다.
7. 강섬유가 혼입된 철근 콘크리트 부재의 극한

전단강도 예측기법이 제시되었으며, 본 예측 기법으로 산출된 예측값과 실험에서 관측된 값의 비는 평균 0.92, 표준편차 0.08로서 실험 치와 비교적 잘 일치함을 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. Swamy, R.N. and Bahla, H.M., "The effectiveness of steel fibers as shear reinforcement," Concrete International, March, 1985, pp.35-40.
2. Mansur, M.A., Ong, K.C.G and Paramasivam, P., "Shear strength fibrous concrete beams without stirrups," Journal of Structural Engineering, Vol.112, No.9, September, 1986, pp. 2066-2079.
3. Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S., "Use of steel fibers as shear reinforcement," ACI Structural Journal, Vol.84, No.3, May, 1987, pp. 216-217.
4. Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S., "Shear in mortar beams containing fibers and fly ash," Journal of Structural Engineering, Vol.114, No. 1, January, 1988, pp.84-102.
5. Swamy, R.N., Manget, P.S. and Rao, C.V.S.K., "The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices," Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, 1974, pp.1-28.
6. Johnston, C.D., "Steel fiber reinforced mortar and concrete-A review of mechanical properties," Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, 1974, pp.127-142.
7. Williamson, G.R., "Effect of steel fibers on the compressive strength of concrete," Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, 1974, pp.195-208.
8. Romualdi, J.P. and Baston, G.B., "Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement," ACI Journal, Vol.60, No.6, June, 1963, pp.775-790.
9. Romualdi, J.P. and Baston, G.B., "Mechanics of crack arrest in concrete," Proceedings of ASCE, Vol.89, EM3, June, 1963, pp.147-168.
10. Shah, S.P. and Rangan, B.V., "Fiber reinforced concrete properties," ACI Journal, Vol.68, No. 2, Feb., 1971, pp.126-135.
11. Kormeling, H.A., Reinhardt, H.W. and Shah, S.P., "Static and fatigue properties of concrete beams reinforced with continuous bars and with fibers," ACI Journal, Vol.77, No.6, Jan.-Feb., 1980, pp.36-43.
12. Swamy, R.N. and Al-Ta'an, Sa'ad A., "Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete," ACI Journal, Vol.78, No.5, Sep.-Oct., 1981, pp.395-405.
13. 이형준, "강섬유를 혼입한 철근 콘크리트 부재의 휨거동에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원, 석사학위논문, 1982.2.
14. 오병환, 이형준, 강영진, "섬유콘크리트의 강도 및 역학적 특성에 관한 연구" 대한 토목학회 논문집, 제9권 제3호, 1989년 8월, pp.49-56.
15. 오병환, "강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재의 휨거동에 관한 이론 및 실험연구" 한국콘크리트 학회 논문집, 제3권 제3호, 1991년 9월, pp.129-139.
16. Oh, Byung Hwan, "Flexural analysis of reinforced concrete beams containing steel containing steel fibers," ASCE, J. Structural Eng., Vol.118, No.10, Oct., 1992.

(접수일자 : 1993. 4. 19)