

강섬유보강 콘크리트의 기계적 성질 및 구조체 적용을 위한 연구 동향

Mechanical Properties and Research Trends in Structural Application of Steel Fiber Reinforced Concrete



심 중 성*



이 차 돈**

1. 서 론

강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete : SFRC)는 건설신소재로서 외국의 경우 1960년대를 시점으로 재료의 물성, 재료의 기계적 성질, 그리고 이 재료가 갖는 우수성을 구조체에 적용하기 위하여 굳지 않은 강섬유보강 콘크리트의 성질이나 혹은 굳은 강섬유보강 콘크리트의 기계적 성질을 규명하기 위한 실험 및 이론 연구가 거의 40년이 지난 오늘날에도 활발히 지속되고 있다. 또한 기존의 일반 콘크리트에 비하여 강도 증진 및 특히 우수한 인성을 확보하는 강섬유보강 콘크리트를 토목 및 건축 구조물에 적용하기 위한 연구도 재료

자체에 대한 연구와 병행하여 꾸준히 지속되고 있다.

국내의 경우 몇몇 시공회사에 의하여 공장 바닥, 지하철 등에 강섬유보강 콘크리트가 사용되고 있기는 하나 선진 외국과는 달리 강섬유보강 콘크리트가 갖는 장점에 대하여 상식적인 수준에서의 편견이 국내에서 지배적이라는 인상이 있으며 또한 모체콘크리트내의 강섬유의 불연속성과 임의성이 갖는 이론적인 해석상의 어려움에 비추어 또한 상식적인 수준에서 강섬유보강 콘크리트 및 이를 응용한 구조부재의 거동을 이해하고자 하는 경향을 보게 된다.

본문에서는 건설신소재의 하나인 강섬유보강 콘크리트가 건설재료로서 갖는 우수한 기계적 성질을

* 정회원, 한양대학교 토목공학과

** 정회원, 중앙대학교 건설대학 건축공학과

객락적으로 고찰하고 또한 국·내외적으로 활발하게 진행되고 있는 강섬유보강 콘크리트의 구조체에 의 응용에 대하여 살펴보고자 한다. 본 고에서는 구체적이고 이론적인 내용을 가급적 피하고자 하였으며 전체적인 연구 경향을 소개하는 방향으로 서술하고자 하였다.

2. 강섬유보강 콘크리트의 기계적 성질

강섬유보강 콘크리트는 콘크리트내에 길이가 짧고 단면이 작은 강섬유를 임의로 혼입함으로써 얻게되는 건설신소재를 일컫는다. 콘크리트내에 강섬유는 임의 방향으로 분포되어 콘크리트가 응력을 받을 때에 발생하는 콘크리트내의 미세균열들을 이들 강섬유들이 제어하거나 큰 균열이 발생하였을 경우 균열된 콘크리트의 양단의 벌어짐을 Bridging 현상으로 제지하여 콘크리트의 강도 및 특히 인성을 증가시키게 된다. 강섬유와 모체콘크리트 접착면은 그림 1과 같이 세 개의 층으로 이루어져 있으며 응력을 받을 때에 다공층(Porous Layer)에서 모체콘크리트와 강섬유간의 Debonding 현상이 일어나게 된다. 강섬유보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 대하여 (1) 인성 증가, (2) 인장, 전단, 휨 강도의 증가, (3) 내충격성, 내마모성, 내피로성, (4) 건조수축의 감소 등을 들 수 있다.⁽¹⁾

2.1 강섬유보강 콘크리트의 압축거동

압축응력시 콘크리트내 강섬유는 압축응력에 의해 발생하는 미세균열을 제어함과 동시에 콘크리트를 구속하는 역할을 한다. 따라서 강섬유보강 콘크리트는 인성, 에너지 흡수능력, 최대압축응력시 변형도를 크게 증가시키며, 그리고 어느정도의 압축

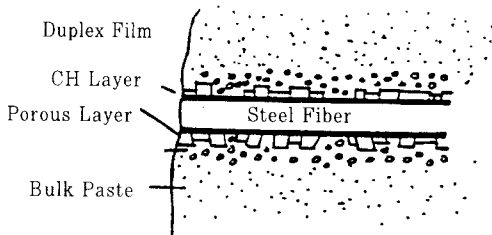


그림 1 강섬유보강 콘크리트의 강섬유주변의 미세구조

강도를 증가시킨다(그림 2). 일반적으로 강섬유의 혼입률과 형상비의 곱인 강섬유보강 Index에 의하여 압축응력-변형도의 곡선이 특성지어진다. 즉 강섬유보강 Index값이 클수록 우수한 압축거동을 나타내게 된다.

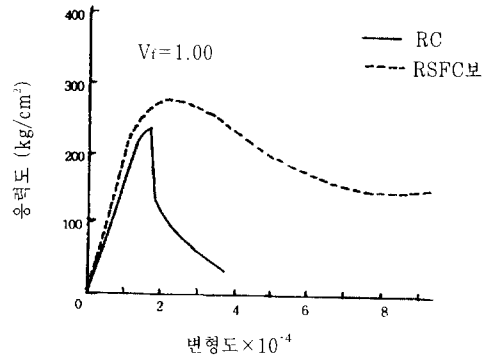
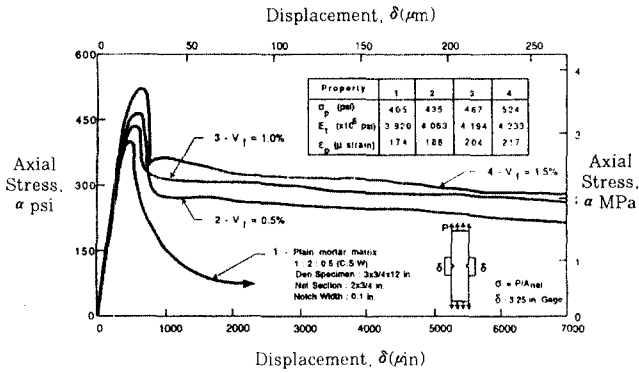


그림 2 강섬유보강 콘크리트의 압축거동

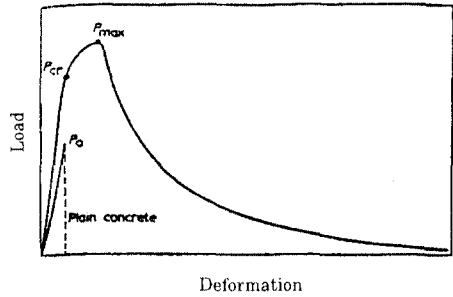
2.2 강섬유보강 콘크리트의 인장 및 휨 거동

인장응력을 받을 때의 모체콘크리트내의 강섬유는 인장응력에 의한 콘크리트내의 균열 확산을 제어하고 강도 후 영역에서 균열을 가로질러 인장응력에 저항하는 강섬유의 뿔힘 작용에 의하여 인장 강도 및 인성이 증가하게 된다. 강섬유보강 콘크리트의 인장강도를 예측하는 고전적인 개념으로는 간격개념(Spacing Concept)과 복합재 개념(Composite Material Concept)이 있다.^(2,3) 간격개념은 강섬유보강 콘크리트의 인장강도가 콘크리트 단면내의 강섬유 상호간 평균거리에 반비례하여 증가한다고 가정하는 한편 복합재 개념은 강섬유보강 콘크리트의 인장강도가 강섬유의 뿔힘 거동을 지배하는 모체콘크리트와 강섬유 표면사이의 부착 강도 크기에 의하여 지배된다고 가정한다. 한편, 이 두 모델이 강섬유보강 콘크리트의 부분적인 강도발현 현상에 근거함을 고려함에 반하여 두 현상 모두를 고려한 상호보완 개념(Interaction Concept)이 개발되었다.⁽¹⁾

강섬유를 혼입함으로써 증가하는 압축강도 및 인성, 그리고 인장강도 및 인성은 강섬유보강 콘크리트가 휨 응력을 받을 때에 휨에 대하여 크게 저항하



(a) 일반 콘크리트와 SFRC의 인장거동 비교



(b) 일반콘크리트와 SFRC의 휨 거동 비교

그림 3 강섬유보강 콘크리트의 인장 및 휨 거동

도록 한다. 실험결과에 의하면 일반적으로 강섬유보강 콘크리트보의 경우, 일반 콘크리트 보에 비하여 휨강도가 약 50%에서 70% 증가함이 고찰된다. 그림 3은 일반 콘크리트와 강섬유보강 콘크리트의 인장 및 휨 거동을 비교하여 나타내고 있다.

2.3 내충격성

일반 콘크리트는 충격 하중에 대하여 약하나 강섬유보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 비하여 거의 10배 이상의 내충격성을 지닌다. 이러한 SFRC의 특성은 충격하중을 받는 활주로나 또는 군사용 방어구조물에 사용된다.

2.4 건조수축의 감소

그림 4는 일반 콘크리트와 강섬유보강 콘크리트 건조수축량을 비교하고 있다. 이 그림에 의하면 강섬유보강 콘크리트의 경우 일반 콘크리트에 비하여 건조수축량이 크게 감소함을 볼 수 있으며 이는 모체 콘크리트내의 강섬유가 건조수축에 의한 균열 제어작용을 함에 기인한다.

2.5 내피로성

콘크리트내의 강섬유 혼입량이 증가하면 피로도도 증가하며 또한 피로하중에 의한 균열폭과 처짐

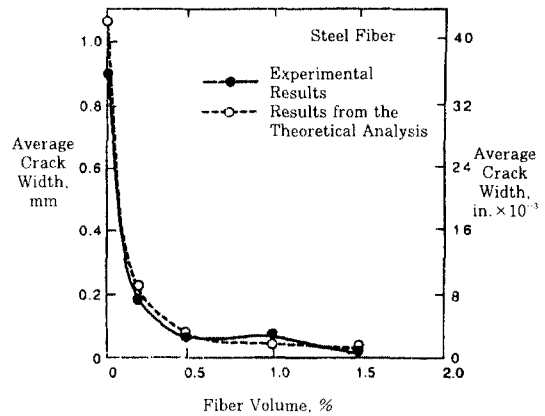


그림 4 일반콘크리트와 강섬유보강 콘크리트의 건조수축 특성 비교

양이 감소하게 된다.⁽⁴⁾ 따라서 도로 및 교량 등에 효율적으로 적용될 수 있으며 실제 기존 도로에 적용한 결과 두께를 약 50% 저감시키는 효과를 가져왔다.

2.6 기타

강섬유보강 콘크리트는 이외에도 내구성, 내열성, 마찰저항 증진 등 구조재로서 많은 우수한 성능을 보유하고 있다. 그러나 이러한 우수성의 확보를 위하여 강섬유보강 콘크리트 배합시 강섬유의 뭉침이 발생하지 않도록 하고 또한 적절한 시공연도에

대한 확보가 필요하다. 즉 기존 콘크리트와 비교하여 혼화제 및 혼화제 사용에 대한 보완 조치가 필요하며 배합순서에도 주의를 기울여야 한다. 강섬유의 종류 및 콘크리트내 강섬유의 양, 그리고 형상비에 따라 강섬유보강 콘크리트 내 강섬유의 분산도 및 시공 연도는 큰 영향을 받는다. 강섬유의 부식에 관하여는 대개의 경우 알칼리성을 띤 콘크리트에 의해 장시간의 심한 외적 조건에서도 콘크리트내 강섬유는 부식을 하지 않음이 고찰되었다.⁽⁵⁾

3. 강섬유보강 콘크리트의 구조체 적용을 위한 연구동향

강섬유보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 비하여 강도 및 특히 인성이 증가하게 된다. 따라서 기존 콘크리트의 최대 취약점이라고 할 수 있는 취성과 파괴를 방지하고 사용하중 하에서 균열 발생을 억제할 수 있는 건설신소재이다. 이러한 강섬유보강 콘크리트의 장점을 건축 및 토목 구조체에 적용하기 위한 연구가 꾸준히 지속되고 있다. 본 장에서는 국·내외 여러 연구가들에 의하여 SFRC를 구조체에 적용하기 위하여 행한 실험 및 이론을 간략히 소개하고자 하였다.

3.1 보

3.1.1 휨

강섬유를 혼입함으로써 콘크리트는 압축, 인장 및 휨 응력을 받을 때에 강도 및 특히 인성이 증가한다. 이러한 SFRC의 특성을 이용하여 여러 연구자들이 기존의 일반 철근 콘크리트 보가 갖는 단점들을 극복하고자 하였다. SFRC를 일반 철근 콘크리트 보에 사용한 보(Reinforced Steel Fibrous Concrete Beam : 이하RSFCB)의 경우 일반 철근 콘크리트 보에 비하여 다음과 같은 장점을 갖는다고 보고되고 있다(그림 5 참조). : ① 단면 최대 저항모멘트가 약 10~20% 정도 증가한다. ② 보의 인성이 일반보에 비해서 크게 증가된다. ③ 보의 균열 제어 메카니즘이 향상된다. ④ 보의 강성이 증가한다. ⑤ 극한 하중의 상태를 지나서도 보의 구조적 안정성이 일반 콘크리트 보에 비하여 우수하게 유

지된다. ⑥ 휨 균열이 일반 보에 비하여 좀 더 골고루 분산되어 발생하므로써 균열 폭이 더 작게 생기며 이는 전단 균열이 압축단으로 진전하는 것을 최소화시킨다. ⑦ 보 압축축의 SFRC는 압축파괴를 어느 정도 방지하여 줌으로써 압축축근이 좌굴하는 것을 방지하여 준다. ⑧ 초기균열발생 모멘트(Initial Cracking Moment)값이 증가 한다. ⑨ 동일한 사용하중 하에서 일반보에 비하여 인장철근의 인장변형도가 감소한다. ⑩ 인장축에만 SFRC를 사용하였을 경우에도 전단면에 SFRC를 사용하였을 경우와 거의 동일한 구조적 효과를 가져온다.

RSFCB의 휨거동을 예측하기 위한 모델은 크게 극한 강도만을 예측하는 모델⁽⁶⁻⁹⁾과 하중-처짐을 예측하는 모델⁽¹⁰⁻¹⁴⁾로 구분된다. 이들 이론 모델들은

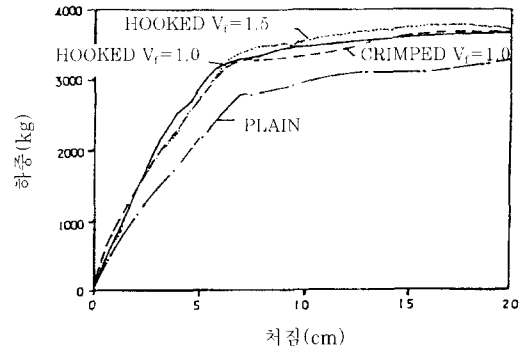


그림 5 강섬유보강 철근콘크리트보(Reinforced Steel Fibrous Concrete Beam)의 휨 거동

기본적으로 SFRC의 압축응력-변형도와 인장응력-변형도의 특성을 이용하여 RSFCB의 휨강도 및 하중-처짐 곡선을 유도하고 있다.

일반철근콘크리트보의 경우, 극한하중 시 콘크리트보 단면의 인장축은 인장응력에 대한 저항이 없는 것으로 간주되나 SFRC의 경우는 콘크리트내 강섬유의 균열제어 작용과 큰 균열을 연결하는 강섬유의 교량효과(Bridging Effect)에 의하여 인장강도가 증가할 뿐만 아니라 인성이 증가하게 된다. 따라서 RSFCB의 경우 극한하중에 이를 때라도 보 단면의 인장축에 어느정도 SFRC의 인장응력에 대한 저항력이 있게된다.

RSFCB의 휨강도를 예측하는 기존 식들은 RSFCB의 인장축 단면에 발생하는 SFRC의 인장

응력에 대한 응력분포 가정과 극한강도 시 RSFCB의 압축단 SFRC의 허용압축 변형도의 값의 크기에 대한 가정에 따라 약간씩 다른 이론식 형태를 띠게 된다. 그림 6은 RSFCB의 극한 하중시 보 단면의 변형도 및 응력도에 대한 가정을 보여주고 있다. 이들 이론들은 SFRC의 압축 및 인장응력의 특성값들을 강섬유의 혼입률, 길이, 직경, 방향성(Orientation Factor) 등을 고려하여 산정한 후보 단면 압축축의 SFRC가 받는 응력에 대한 등가 응력블록과 평형이 이루어 지도록 평형조건식을 세운 후 반복적인 계산을 통하여 중립축을 산정하고 이 중립축을 중심으로 보 단면의 저항모멘트를 산정하게 된다.

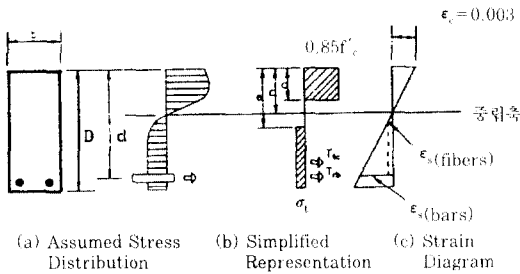


그림 6 강섬유보강 콘크리트보의 변형도 및 응력도에 대한 가증 예

한편, 여러 형태의 RSFCB에 대한 하중-처짐(또는 모멘트-처짐이나 모멘트-곡률) 관계를 예측하는 이론이 제시되었다. R. Craig^[10]는 콘크리트의 압축단의 변형도를 점차적으로 증가시키면서 주어진 압축단의 변형도에 대한 인장, 압축 철근의 변형도를 산정한 후 이에 대한 각 응력을 각각의 응력-변형도로부터 구한 후 단면 내 발생된 SFRC의 압축 및 인장응력의 합과 각 철근에 발생된 응력의 합이 평형조건에 이르게 되는 중심축을 반복적인 방법을 통하여 찾는 알고리즘을 사용하였다. 중립축을 산정하고 면내 휨 저항 모멘트를 계산하고 이때의 변형도로 부터 보의 곡률을 산정하여 보의 처짐을 계산하였다. 이 외에 RSFCB의 균열전 거동, 균열 후 거동, 극한상태의 거동에 대한 보 단면의 변형도 및 응력도를 가정하여 수치해석적이 아닌 이론식으로 RSFCB의 하중-처짐곡선을 유도하거나,^[11]

step-by-step 알고리즘을 이용하여 RSFCB의 모멘트-처짐관계를 유도하는 방법,^[12] RSFCB에 대한 유효휨 강성을 실험적으로 산정하여 주어진 모멘트 크기에 대한 처짐을 계산하는 방법,^[13] 비선형 유한 요소법을 이용하여 RSFCB의 하중-처짐곡선을 예측하는 방법^[14,15] 등이 사용되었다. 다른 모델들과 비교하여 비선형 유한요소법에 의한 모델은 RSFCB의 휨강성, 휨강도, 인성 등의 특성을 이론적으로 고찰할 수 있는 특성을 갖는다.

3.1.2 전단

여러 연구자들에 의해 실험고찰된 RSFCB의 전단거동은 다음과 같이 정리될 수 있다.

(1) 혼입률의 영향

강섬유의 혼입률이 증가할수록 보의 전단강도가 증가하며 파괴 메카니즘이 전단파괴에서 휨 파괴로 변화한다.^[16-18] 강섬유를 첨가함으로써 증가하는 전단 강도의 증가율은 동일한 조건 하에서의 휨 강도 증가율보다 크다.

(2) 강섬유의 형상비(강섬유의 직경에 대한 길이의 비)의 영향

동일한 혼입률일 경우 형상비가 큰 강섬유로 혼입된 SFRC로 타설된 보가 전단 및 휨에 대하여 효율적으로 저항하였다.

(3) 인장철근비의 영향

인장철근비가 증가하면 휨 저항이 증가하고 따라서 강섬유보강 철근콘크리트보는 전단파괴양상을 보인다.

(4) Dwarakanath 등^[19]에 의하면 전단 스펙비가 작을수록 강섬유를 첨가함에 따른 전단강도의 증가함이 고찰되었다.

(5) 콘크리트 압축강도의 영향

콘크리트의 압축강도가 증가하면 강섬유보강 철근콘크리트보의 전단강도도 증가한다.

강섬유보강 철근콘크리트보의 전단강도를 예측하기 위한 식은 기본적으로 기존의 철근콘크리트보의 전단강도를 예측하는 이론식에 사인장 균열에 따라 저항하는 강섬유의 전단 저항력을 함께 고려함으로써 산정한다(그림 7). 그림 7에서 V_a 는 균열면을 따라 발생하는 골재에 의한 마찰저항력을 나타내며 V_{bv} 는 콘크리트의 전단내력, V_d 는 인장철근의 장부

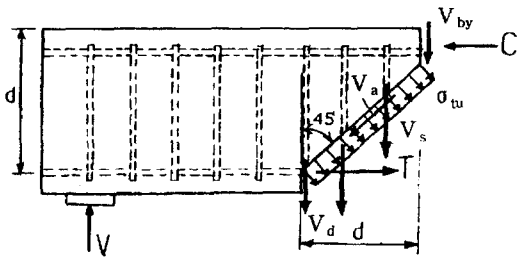


그림 7 강섬유보강 철근콘크리트 보의 전단저항

작용에 의한 전단저항력 σ_{tu} 는 강섬유의 뿔힘 작용에 의한 전단력, 그리고 V_s 는 스티럽의 전단저항을 나타낸다. 여러 연구가에 의하여 여러 형태의 σ_{tu} 가 가정되었으며 전단강도에측식은 기본적으로 이 가정된 σ_{tu} 에 대하여 서로 다른 형태를 띤다고 볼 수 있다.

3.1.3 비틀림(Torsion)

장방형 단면을 갖는 강섬유 보강 콘크리트보에 대하여 여러 실험 및 이론 연구가 행하여 졌으며 다음과 같은 비틀림 특성이 고찰되었다.

- (1) 균열이 발생하기 전의 보의 비틀림 강성은 비틀림-모멘트 크기의 비와는 무관하다.
- (2) 비틀림이나 비틀림과 모멘트의 조합하중을 받을 경우에 SFRC보는 편축(Skew Axis)에 대하여 휨 파괴를 한다.
- (3) 보축과 비틀림 강도는 비례하여 증가한다.
- (4) 모멘트에 비해서 비틀림의 크기가 상대적으로 클 경우 보의 비틀림 강도는 모멘트에 대하여 큰 영향을 받지 않으나 비틀림에 대하여 모멘트가 클 경우는 약간의 모멘트 증가가 SFRC보의 비틀림강도를 크게 감소 시킨다.

E. I. El-Niema⁽²⁰⁾는 RSFCB가 순수한 비틀림을 받는 경우 콘크리트, 강섬유, stirrup, 축방향철근(축방향 철근의 장부작용(Dowel Action)에 의한 비틀림에 대한 저항력)에 의한 비틀림 저항력을 실험 및 이론적으로 고찰하였다. El-Niema⁽²⁰⁾는 비틀림강도를 산정하기 위하여 기본적으로 ACI식을 사용하였으며 여기에 강섬유의 기여를 공간 트러스 모델(Space Truss Model)에 근거한 식을 이용하여 추가하였다.

실험결과에 의하면 강섬유를 첨가함으로써 Stirrup이 없이 강섬유만으로 보강된 보의 경우 $V_f=1.2\%$ 에 대해 종국 비틀림 강도가 61.5%, 그리고 Stirrup과 함께 보강된 경우 66% 증가한 것으로 나타났다. M. A. Mansur⁽²¹⁾ 등은 T. T. C. Hsu⁽²²⁾가 제안한 수치해석 모델을 이용하여 RSFCB가 비틀림 응력을 받을 때의 비틀림 모멘트-비틀림 관계를 추정하였다. 이 모델은 Equilibrium 및 Compatibility 방정식, 재료의 응력-변형도가 만족되도록 반복적인 방법으로 실제해로 근접토록 하였으며 실험체를 모델링하기 위한 모델은 그림 8과 같다.

F. F. Wafa⁽²³⁾ 등은 일반철근콘크리트보와 프리스트레스트 콘크리트보에 강섬유보강콘크리트를 사용하였을 경우 증진되는 비틀림강도, 비틀림강성, 균열양상 등을 실험과 이론으로 고찰하였다. 강섬유보강프리스트레스트보의 경우 비틀림 강도는 기존의 식에 강섬유보강콘크리트에 의하여 증진되

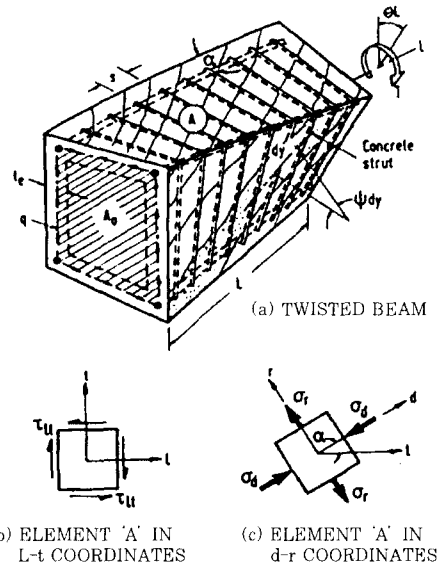


그림 8 강섬유보강 콘크리트보의 비틀림거동에 대한 모델링

는 휨강도 및 쪼갬강도를 수정하여 사용하였다. 본 실험결과에 의하면 강섬유보강 프리스트레스트보의 경우 일반 프리스트레스트보에 비하여 인성이 크게 증가하였으며 비틀림 강도의 경우는 혼입률이

1.0%보다 작은 경우 보의 강도는 거의 증가하지 않았으나 이 보다 크게 혼입률을 2.0%까지 점진적으로 증가시켰을 경우 일반 프리스트레스트보 보다 29%까지 증가함이 고찰되었다. 이 밖에도 H. M. S. Abdul-Wahab⁽²⁴⁾이나 G. Batson⁽²⁵⁾ 등 여러 연구가들에 의하여 RSFCB보가 전단, 휨과 동시에 비틀림을 받는 경우에 대한 실험연구가 진행되었다. 이들 연구결과에 의하면 강섬유보강 콘크리트를 사용함으로써 강도 및 강성, 그리고 특히 인성이 증가하는 것으로 보고되고 있다.

3.2. 보-기둥 접합부

보-기둥 접합부의 경우 구조물이 지진력과 같은 횡력을 받을 때에 전단에 대하여 충분한 전단강도가 요구되며 또한 인성의 확보 및 충분한 에너지 소산능력이 요구된다. 이러한 조건을 충족시키기 위한 보-기둥 접합부는 일반적으로 철근배근이 집중되어 시공상 어려움이 있으며 또한 반복하중을 받는 경우에 정착과파괴가 일어날 수 있다. 여러 연구가들에 의해 이러한 보-기둥 접합부의 문제점들을 SFRC를 사용함으로써 해결하기 위한 실험 및 이론연구가 실행되고 있다. R. J. Craig⁽²⁶⁾ 등에 의하면 SFRC를 사용한 경우 콘크리트에 대한 구속효과와 접합부에서의 구조체의 일체성보존, 전단내력, 강성이 우수했으며 모멘트 저항력이 일반 보-기둥 접합부보다 15%정도 증가하였으며 또한 더욱 우수한 인성이 확보되었다. P. R. Gefken⁽²⁷⁾은 일반 철근콘크리트의 Type 2 형태의 보-기둥 접합부에 강섬유보강콘크리트를 사용함으로써 접합부의 후프철근간격을 더 넓게 배근하는 것이 가능한지를 실험적으로 입증하고자 하였다. 그림 9는 P. R. Gefken이 실험한 시험체를 나타내며 그림 10은 가력 및 그 결과를 나타낸다. 그림 10에서 JA1 및 JC1은 각각 일반철근콘크리트 보-기둥 접합부(후프 spacing=5cm)의 거동과 강섬유보강철근콘크리트 보-기둥 접합부(후프 spacing=8.4cm, Vf=%)의 거동을 나타낸다. 본 실험에 의하면 후프의 spacing을 5cm에서 8.4cm로 약 1.7배 증가시키더라도 강섬유보강철근콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 경우 일반 철근콘크리트의 보-기둥

접합부와 비교하여 동등하거나 또는 그 이상의 인성과 강도, 에너지 소산능력(energy dissipation capacity), 그리고 접합부의 강성이 확보됨이 고찰되었다. 또한 일반철근콘크리트 보-기둥 접합부는 콘크리트의 탈락현상이 매우 심한 반면에 강섬유보강 철근콘크리트 보-기둥 접합부는 약간의 탈락현상이 있었거나 또는 전혀 탈락현상이 나타나지 않았음이 고찰되었다. 이 보고서에 의하면 SFRC를

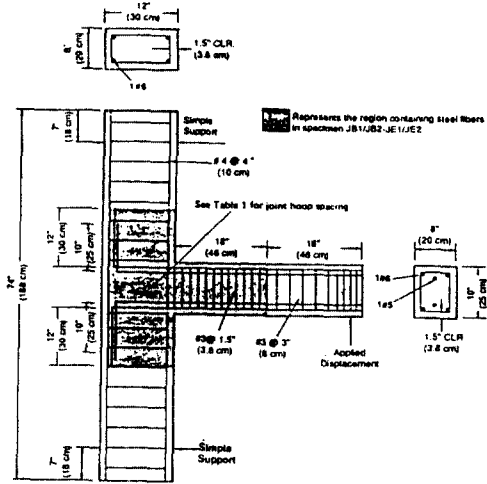
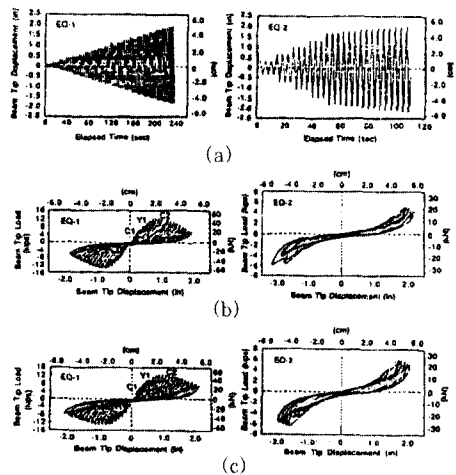


그림 9 보-기둥 접합부의 실험체⁽²⁷⁾



Applied loading and load-deflection curves: (a) cyclic loading sequences; (b) JA1 load-deflection curves; (c) JC1 load-deflection curves

그림 10 보-기둥 접합부 실험체 실험 결과⁽²⁷⁾

사용할 경우 ACI-ASCE 352위원회가 규정한 Type 2형태의 접합부를 Type 1형태의 접합부로 치환할 수 있다고 제안되었다.

T. Jiuru⁽²⁸⁾ 등에 의하면 외부 보-기둥 접합부의 경우 SFRC를 사용하면 보의 수평철근의 수평 정착 길이가 20d(여기서 d=철근직경) 보다 큰 경우에는 수직 정착 길이는 감소될 수 있음이 실험고찰되었다. 이러한 강섬유보강철근콘크리트 기둥-접합부에 대한 연구를 M. Lakshminath⁽²⁹⁾ 등은 철근콘크리트골조의 기둥-접합부에 SFRC를 타설하여 횡력 시의 거동을 실험, 관찰하였다. 그림 11은 실험체 및 실험장치를 나타내며 그림 12는 그 실험 결과를 나타낸다. 본 실험결과에 의하면 사용하중 상태에서는 일반 철근콘크리트 골조에 비하여 강섬유보강 철근콘크리트 골조의 거동이 약간 우수하나 인성, 에너지 소산능력, 균열손상에 대한 저항력에 대해서는 상당히 우수함이 고찰되었다. 특히 SFRC를 보-기둥 접합부의 hinge 부분에 사용함으로써 사용하중 범위에서 약 25% 정도의 강성증가가 고찰되었으며 사이클 하중을 받을 때 인성이 100%, 에너지 소산능력은 100% 이상 증가하였으며 그리고 균

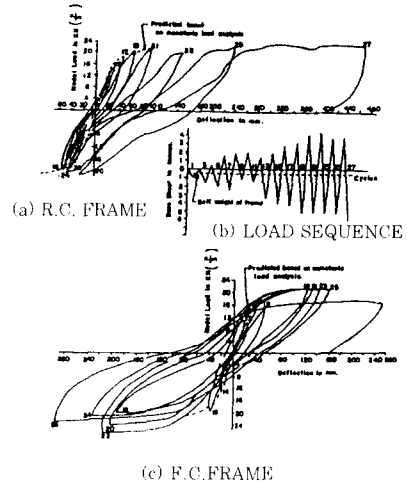


그림 12 보-기둥 접합부에 강섬유 보강 철근 콘크리트를 부분적으로 타설한 골조의 실험결과⁽²⁹⁾

열폭은 40% 이하로 감소하는 향상된 거동이 고찰되었다. 이밖에도 내부 보-기둥 접합부에 대한 유사한 실험도 보고되고 있다.⁽³⁰⁾

3.3. Coupled Shear Wall 접합부

비교적 높은 철근콘크리트 건물의 경우, 풍하중이나 횡력에 저항하기 위하여 Coupled Shear Wall(CSW) system이 사용된다(그림 13 참조).

O. Chaallal⁽³¹⁾ 등은 Coupled Shear Wall(CSW)이 지진하중이나 풍하중을 받는 경우에 대하여 SFRC를 사용함으로써 전단 벽체와 벽체 연결부 단부의 철근량을 감소시키고도 전체적인 CSW의 인성과 콘크리트의 구속효과를 증진할 수 있는가에 대하여 실험하였다. 사용된 강섬유양은 혼입률이 0.76% 로서 그림 14는 본 실험에 사용된 시험체이며 그림 15는 그 결과를 나타낸다.

실험결과에 의하면 SFRC가 반복하중을 받을 때 hysteresis loop가 일반 RC의 loop 보다 좀더 안정되었으며 그림 14에 나타나듯이 7번째 반복하중 후에 SFRC 시험체가 더 큰 에너지 소산율을 갖게 됨이 고찰되었으며 특히 14번째 cycle에서는 32% 이상의 에너지 소산율을 나타냄이 고찰되었다. 또한 RC가 14번째 반복하중 시에 파괴된 반면 SFRC의 경우는 16번째 반복하중시에 파괴됨이 고찰되었다. SFRC 접합부는 단부에서 부착 및 정착

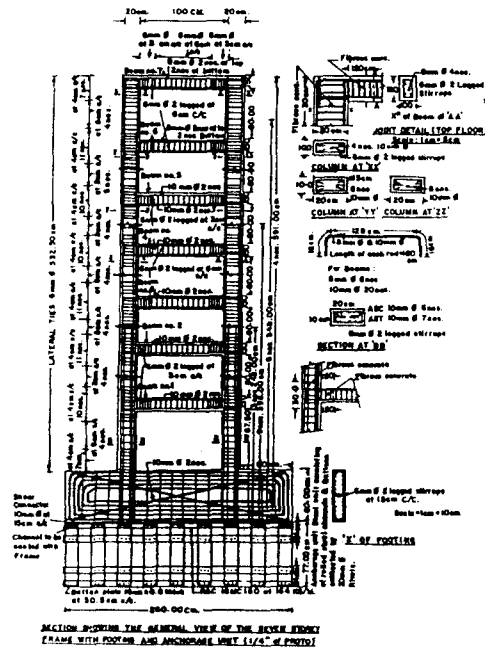
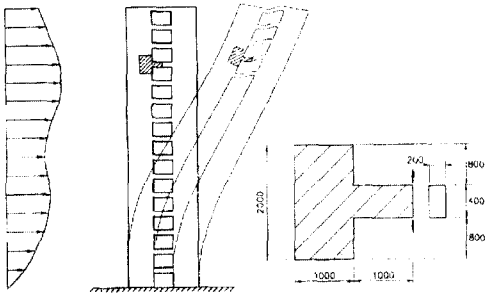


그림 11 보-기둥 접합부에 강섬유보강 철근콘크리트를 부분적으로 타설한 골조의 실험체⁽²⁹⁾



(a) lateral loading (b) CSW behavior (c) joint model

그림 13 CSW의 횡력에 대한 저항거동

이 더욱 우수했으며 그 결과 폭이 작은 균열이 더 촘촘히 발생하였고 콘크리트의 탈락도 더 적었음이 고찰되었다.

3.4. Corbel

N. I. Fattuhi^(42, 34, 50)와 H.M.S. Hashim⁽³³⁾ 등은 SFRC가 휨과 특히 전단저항에 유효하게 저항하는 것에 착안하여 길이가 짧은 깊은 보 형태를 갖

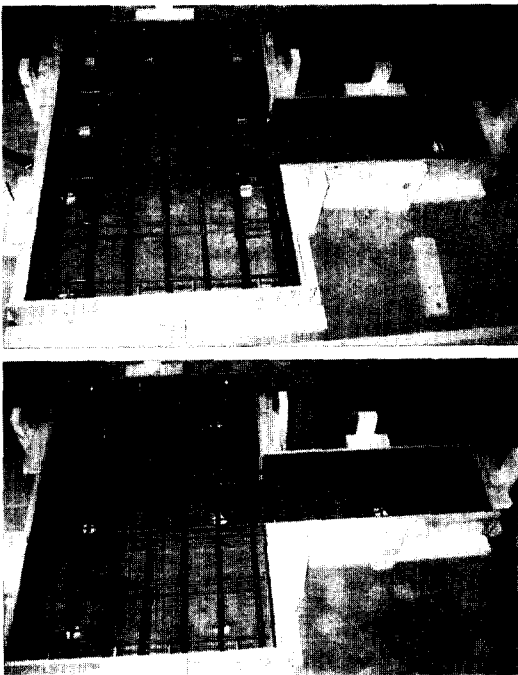


그림 14 CSW에 대한 실험체⁽³¹⁾

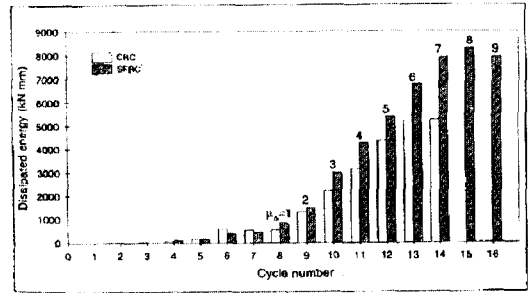


그림 15 CSW 실험체에 대한 실험 결과⁽³¹⁾

는 Corbel에 SFRC를 사용함으로써 Stirrup을 완전히 또는 부분적으로 대체하기 위한 실험을 실시하였다. ACI 318-83 규정에 의하면 Corbel에 배근되는 Stirrup은 주철근 양의 50% 이상 배근하도록 규정되어 있다. 따라서 SFRC를 사용함으로써 Corbel내 철근 배근의 혼잡성을 줄이고 시공성을 향상시키고 동시에 구조적인 거동을 향상시키고자 하는 연구노력이 지속되고 있다. N. I. Fattuhi 등은 Stirrup양을 강섬유양으로 환산한 후 Stirrup을 강섬유로 완전히 대체하는 실험연구를 행하였으며 M.S.Hashim은 전단스팬비 및 강섬유 용적률(Vf)을 변수로 하되 Corbel내의 주근 및 Stirrup 양은 일정하게 유지하여 강도 및 거동을 실험 고찰하였다.

그림 16은 H.M.S. Hashim⁽³³⁾의 실험체 및 그 결과에 대하여 나타내고 있다. 이 실험결과를 예로 들면 강섬유를 1% 용적률로 사용하였을 경우 Corbel의 강도가 40% 증가함이 고찰되었다. 저자의 Corbel전단 강도추정을 위한 예측식은 ACI의 일반철근콘크리트에 관한 식에 SFRC내 강섬유의 전단저항을 고려한 식을 추가하여 나타내었으며 이 식은 실험치 값을 잘 예측하였다.

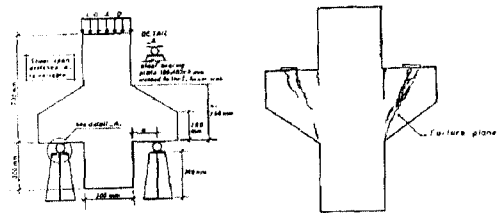


그림 16 Corbel 실험체 및 실험 후 파괴 형상

3.5. 프리캐스트 접합부

K. S. Soubra⁽³⁶⁾ 등은 프리캐스트보 접합부에 SFRC를 사용한 경우 지진과 같은 동적하중하에서 향상되는 거동을 실험적으로 고찰하고자 하였다. 이 실험결과에 의하면 SFRC를 접합부에 사용하였을 경우 주어진 강도, 연성, 그리고 에너지소산능력이 크게 향상됨이 고찰되었다.

H.M.S. Abdul-Wahab⁽³⁷⁾ 등은 프리캐스트 패널의 접합부에 SFRC를 사용하여 접합부의 거동을 향상시키고자 하였다. 그림 17 및 그림 18은 실험체, 실험장치, 실험결과 등을 나타낸다. 실험결과에 의하면 접합부의 형태에 따라 강섬유의 용적률이 1%인 경우 Grooved Joint의 경우에 10%, Plane Joint의 경우 20%, 그리고 Castellated Joint의 경우 54%의 전단강도가 증진되었음이 고찰되었다. 저자들은 접합부의 강도를 예측하기 위한 식을 ACI Building Code 및 BS 8110식에 강섬유에 의한 전단강도 기여도를 추가함으로써 유도하였는데 이 식은 실험치를 비교적 잘 예측하였다.

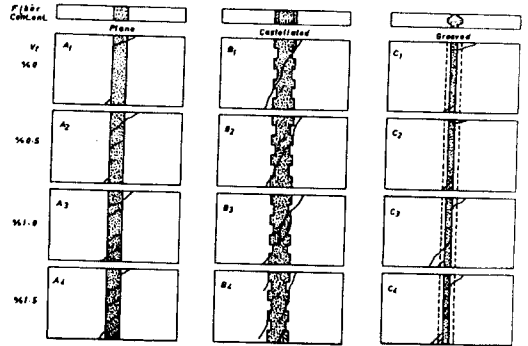
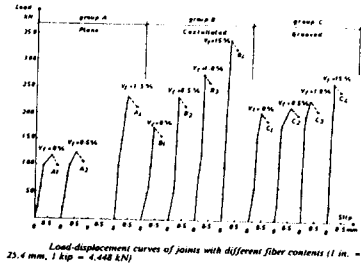


그림 18 프리캐스트 패널 접합부에 대한 실험 결과⁽³⁷⁾

3.6. Punching 전단

S. D. B. Alexander⁽³⁸⁾ 등은 SFRC가 전단저항력이 향상된다는 점에 감안하여 슬래브에 기동축력이 펀칭 전단파괴를 일으킬 때의 경우에 대하여 실험, 고찰하였다. 그림 19 및 그림 20은 실험체, 실험장치, 그리고 실험결과를 나타낸다. 변수로는 슬래브의 피복두께와 강섬유의 혼입률로서 그림 20에 표로서 나타내었다. 이 실험결과에 의하면 모든 실험체가 항복선을 형성하였으나 중구적으로 전단파괴 양상을 띠었으며 이 항복선상의 강섬유보다는 항복선과 멀리 떨어져 있는 강섬유의 기여에 의해 모멘트 강도가 증가하였고 강섬유를 첨가함으로써 펀칭 전단력이 20%내지 30% 증가하였으며 인성도 증가하였음이 고찰되었다.

3.7. 슬래브

H. Falkner⁽³⁹⁾ 등은 공장바닥 슬래브용으로 강섬유보강 콘크리트의 효율성에 대하여 실물 크기의 슬래브판(3.0×3.0×0.15m)에 대하여 실험과 함께 휨 강도를 예측하기 위한 이론식을 제안, 검증하

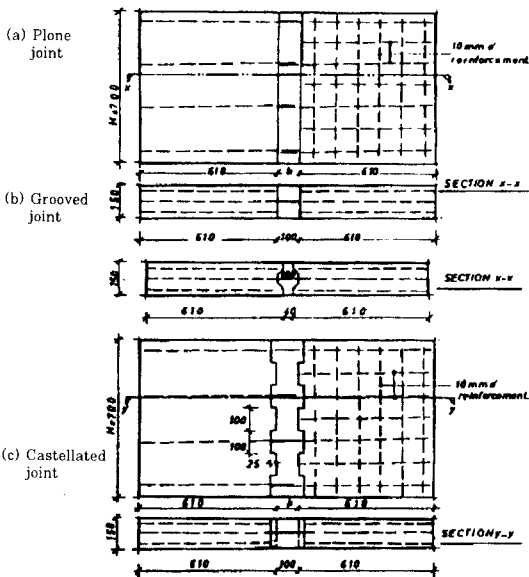


그림 17 프리캐스트 패널 접합부 실험체⁽³⁷⁾

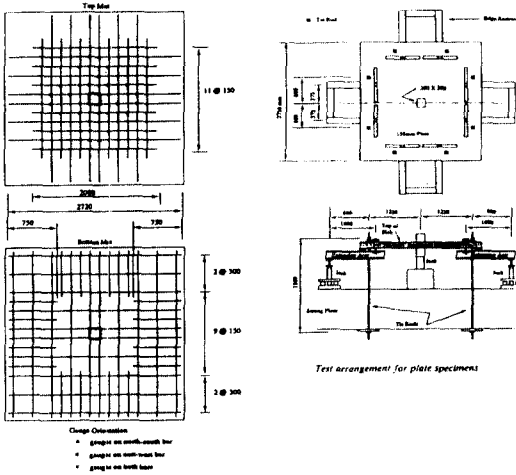
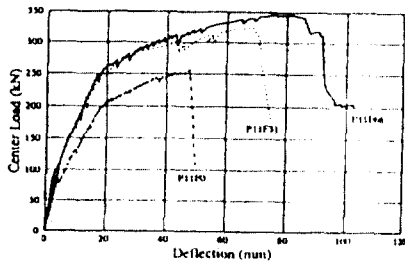


그림 19 편칭전단에 대한 슬래브 실험체(38)

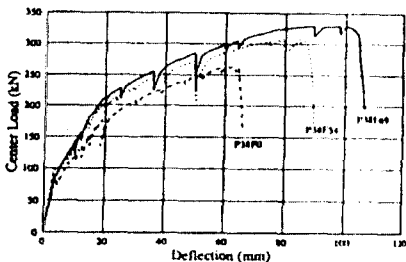
Table - Test descriptions

Mark	Type of test	Clear cover, mm	Series and relevant quantity
P11F0	Plate	11	Fiber, 0 kg/m ³
P11F31	Plate	11	Fiber, 31kg/m ³
P11F66	Plate	11	Fiber, 66kg/m ³
P38F0	Plate	38	Fiber, 0kg/m ³
P38F34	Plate	38	Fiber, 34kg/m ³
P38F69	Plate	38	Fiber, 69kg/m ³

1kg/m³=1.68 lb/yd³



11mm(0.4in.) clear cover



38mm(1.5in.) clear cover

그림 20 편칭전단 실험 결과(38)

였으며 균열 후 연성을 갖는 SFRC의 거동을 정확하게 추적하기 위해서는 비선형 유한 요소법을 사용할 것을 제안하였다.

J. W. Spires⁽⁴⁰⁾ 등은 창고바닥용으로 SFRC를 사용하고자 실험을 행하였다. 저자들은 차륜하중과 통로폭 등을 고려하여 탄성이론에 근거하여 최대 부모멘트가 발생하는 위험 통로폭(critical aisle width) 및 모멘트값을 산정한 후 최소 SFRC 바닥 slab의 두께를 도표를 이용하여 산정할 것을 제안하였다. 철근이나 또는 용접철망을 사용하는 대신에 SFRC를 slab에 직접 타설함으로써 재료비 절감 및 시공성의 우위를 확보할 수 있다.

M.A.Al-Ausi⁽⁴¹⁾ 등은 단순지지된 22개의 강섬유보강 콘크리트 슬래브에 대하여 정적 및 충격실험을 행하였다. 정적실험 결과 강섬유로 보강되지 않은 슬래브의 경우에 비하여 강섬유보강 슬래브의 경우는 점진적인 파괴양상을 보였으며 또한 강도가 용적율 1.2%인 경우 약 40% 증가하였다. 충격하중의 경우에는 1.2%의 용적율을 갖는 강섬유보강 슬래브의 경우 무보강 슬래브에 비하여 파괴에 이르기까지의 타격횟수가 347% 증가함이 관찰되었다.

3.8. 프리스트레스트 콘크리트 보

M. Lakshmipathy⁽⁴²⁾ 등은 일반 및 강섬유보강 포스트텐션된 프리스트레스트보의 휨거동 및 파괴 균열 양상 등에 대하여 정적하중과 reversed cyclic 하중에 대해 실험적으로 고찰하였다. 포스트텐션용 텐돈은 편심이 있는 경우와 없는 경우로 구분하였다. 실험결과에 의하면 강섬유보강 프리스트레스트보의 강도는 일반 프리스트레스트보의 강도보다 6%내지 10% 증가하였고 균열 후 보의 강성도 10% 정도 증가하였다. 단순 정적하중시 강섬유보강 프리스트레스트보의 에너지 소산력은 18% 정도 증가하였으며 reversed cyclic 하중의 경우에는 일반 프리스트레스트보의 값과 동일하였다. 특히 항복강도에 이른 후의 cyclic 하중을 받는 경우에는 SFRC의 효과가 크게 두드러지지 않음이 관찰되었다. R. Narayanan⁽⁴³⁾ 등은 강섬유보강 프리스트레스트보가 비틀림, 휨, 그리고 전단과 같은 조

합하중을 받는 경우에 대하여 실험적인 연구를 행하였다. 실험결과에 의하면 휨과 비틀림을 동시에 받는 보의 경우 보가 받는 모멘트 크기에 따라 비틀림에 의한 초기균열하중의 크기가 영향을 받았으나 보의 종국모멘트 강도에 대해 가한 모멘트의 비가 0.5에서 0.75 사이에서 약간의 초기 비틀림 균열하중이 감소함이 고찰되었다. 한편 보가 휨, 비틀림, 전단을 동시에 받는 경우에는 균열 발생 및 전전도가 휨 모멘트와 전단력 모두의 영향을 받았다. 프리스트레스트보의 경우 순수 비틀림을 받는 경우보다 휨(종국휨강도의 25%내지 50%)과 함께 비틀림이 가해질 때 비틀림 강도가 10%내지 20% 증가하였다. 이러한 증가추세는 휨모멘트가 종국휨강도의 75%이상에 이르게 되면 감소하나 순수 비틀림시의 비틀림강도보다는 크게 나타났다. 따라서 비틀림에서 프리스트레스트보에 SFRC를 사용하면 순수 비틀림에서 강도가 크게 증가하며 휨모멘트가 함께 가해질 경우에는 비틀림 강도의 증가가 더욱 증가함이 고찰되었으며 휨모멘트만 가해질 경우보다 더욱 효과적으로 비틀림에서 강도가 증가함이 고찰되었다. D. C. O'Leary⁽⁴⁴⁾ 등은 실물크기의 Partially Prestressed T-beam의 강섬유보강 효과에 대하여 실험고찰하였다. 이 실험에 의하면 강섬유보강에 의하여 프리스트레스트보의 휨 강도가 증가하였고 처짐 및 최대 균열 폭이 사용하중 하에서 감소하였으며 일반 프리스트레스트보보다 균열 후 휨강성이 증가하였다. 보의 종국모멘트강도를 Strain Compatability방법을 사용하여 산정하였다.

3.9. 기둥

R. J. Craig⁽⁴⁵⁾ 등은 축력, 또는 축력과 이축 휨을 받는 36개 기둥에 대한 거동을 실험적으로 규명하고자 하였다. 실험결과 축력만을 받는 경우 기둥의 인성은 약간만 증가하였다. 큰 전단력과 축력을 동시에 받는 기둥의 경우에는 이축모멘트가 가해질 때 일반 철근콘크리트 기둥은 매우 취성적인 파괴를 일으키나 강섬유를 첨가함으로써 인성이 증가함이 고찰되었다. 또한 저자는 실험을 통하여 축력-모멘트 상관곡선을 강섬유보강 콘크리트기둥에 대하여 산출하였다.

3.10 기타

내충격 구조물-충격하중에 대한 저항력이 요구되는 구조물에 적용할 수 있다.

경량콘크리트 구조물-일반콘크리트 구조물에 사용하는 것 또는 그 이상으로 경량콘크리트에 강섬유보강 콘크리트를 사용할 경우, 특히 인장응력하에서 큰 잇점을 얻을 수 있다.

고강도 콘크리트-고강도 콘크리트를 좀더 연성적인 경향을 갖도록 하며 또한 강섬유에 의한 구속효과를 기대할 수 있다. 또한 고강도 콘크리트나 철근을 사용함으로써 감소되는 부재의 처짐을 방지할 수 있다.

합성구조-메탈텍 등에 사용되어 비탄성 영역에서의 구조체의 일체성 및 연성을 확보한다.

보수 및 보강재료-공장바닥의 보수 및 보강용으로 사용될 수 있다.⁽⁴⁶⁾

4. 결 론

강섬유보강 콘크리트에 대한 물성, 기계적 성질, 그리고 구조적 응용에 관한 연구는 1960년대 이래 지금까지 꾸준히 지속되고 있다. 본 고에서는 강섬유보강 콘크리트 내의 강섬유의 불연속성과 임의성이 갖는 재료적 특성과 타 구조재와의 합성작용 등에 대한 재료적, 구조적인 이해를 위하여 부분적이기는 하나, 지금까지 여러 연구가들에 의하여 행하여진 다양한 실험과 그 결과, 그리고 이론의 일부를 발췌하여 가능한 한 간략히 소개하고자 하였다.

국내의 경우에도 몇몇 연구가들에 의하여 실험 및 이론연구가 진행되고 있으나 여전히 강섬유보강 콘크리트에 대한 산업체 및 학계의 관심이 강섬유보강 콘크리트 및 이의 구조재에의 응용에 관하여 상식적이며 또한 보수적임을 볼 수 있다.

독자들이 강섬유보강 콘크리트의 유용성 및 그 응용분야에 대하여 조금이나마 이해하기를 바라며 또한 앞으로는 강섬유보강 콘크리트에 대하여 좀 더 열린 마음이 되기를 기대하면서 글을 맺고자 한다.

참 고 문 헌

1. C. D. Lee, "Constitutive Modeling and Flexural Analysis of Steel Fiber Reinforced Concretes for Structural Applications," Ph. D Dissertation, Michigan State University, 1990.
2. J. P. Romualdi and J. A. Mandel, "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," *ACI Journal*, Vol. 61, June, 1964, pp. 657-671.
3. R. N. Swamy and P. S. Mangat, "A Theory for the Flexural Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 4, 1974, pp. 313-325
4. H. A. Kormeling, H. W. Reinhardt, and S. P. Shah, "Static and Fatigue Properties of Concrete Beams Reinforced with Continuous Bars and with Fibers," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 77, No. 1, January-February 1980, pp. 36-43.
5. M. Schupack, "Durability of SFRC Exposed to Severe Environments," *Steel Fiber Concrete*, Elsevier Applied Science Publishers, Ltd, 1986, pp. 479-496.
6. H. V. Dwarakananth and T. S. Nagaraj, "Deformational Behavior of Reinforced Fiber Reinforced Concrete Beams in Bending," *ASCE J. of Structural Eng.*, Vol. 118, No. 10, October, 1992.
7. "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete," *ACI Structural Journal*, September-October 1988, pp. 563-579
8. H. I. Ahmed and R. P. Pama, "Ultimate Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams with Large Volumes of Short Randomly Oriented Steel Fibres," *Asian Institute of Technology*, Bangkok, Thailand, pp. 467-485.
9. C. H. Hegager, "Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams," *ASCE, J. of Structural Eng.*, Vol. 102, January, 1976.
10. R. J. Craig, J. Decker, L. Dombrowski, R. Laurencelle, and J. Federovich, "Inelastic Behavior of Reinforced Fibrous Concrete," *ASCE, J. of Structural Eng.*, Vol. 113, No. 4, April, 1987, pp. 802-817.
11. T. Lim, P. Paramasivam, and S. Lee, "Behavior of Reinforced Steel-Fiber-Concrete Beams in Flexure," *ASCE, J. of Structural Eng.*, Dec. 1987, pp. 2439-2457.
12. C. T. Hsu, R. L. He and A. S. Ezeldin, "Load-Deformation Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, November-December, 1992, pp. 650-657.
13. S. H. Alsayed, "Flexural Deflection of Reinforced Fibrous Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, January-February, 1993, p.
14. S. A. Al-Ta'an and N. , "Non-linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members," *Civil Eng. Department, Mosul University, Nosal, Iraq*, pp. 435-446.
15. 이차돈, 홍성원, 이수권 "강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨거동", *대한건축학회 논문집*, 제11권, 제5호, 1995, pp. 151-161.
16. A. K. Sharma, "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, July-August, pp. 624-627.
17. 심종성, 이차돈, 김규선, 오홍섭, "흑트강섬유보강 철근 콘크리트 보의 전단거동에 대한 실험적 연구", *한국콘크리트학회지* 제7권 5호, 1995. 10, pp.179-188.
18. S. A. Ashour, G. S. Hasanain, and F. F. Wafa, "Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, March-April 1992, pp. 176-184
19. H. Y. Dwarakanath and T. S. Nafaraj, "Deformational Behavior of Reinforced Fiber Concrete Beam in Bending," *ASCE Journal, Structural Eng.*, Vol. 118, No. 10, October, 1992.
20. E. I. El-Niema, "Fiber Reinforced Concrete Beams under Torsion," *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 5, September-October, 1993, pp. 489-495
21. M. A. Mansur, S. Nagataki, S. H. Lee and Y. Oosumimoto, "Torsional Response of Reinforced Fibrous Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, January-February 1989, pp. 36-44.
22. T. T. C. Hsu, "Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion", *Research Report No. OHCE 86-9*, U. of Houston, Aug, 1986, 63.
23. F. F. Wafa, A. Hasnat, and O. F. Tarabolsi, "Prestressed Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Torsion," *ACI Structural Journal*, May-June, 1992, pp. 272-283.

24. H. M. S. Abdul-Wahab, M. A. Al-Ausi, and S. H. Tawfiq, "Steel Fiber Reinforced Concrete Members under Combined Bending, Shear, and Torsion," University of Technology, Baghdad, Iraq.
25. G. Batson, T. Terry, and M. Chang, "Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Bending and Torsion," SP 81-3, pp. 51-69.
26. R. J. Craig, S. Mahadev, C. C. Patel, M. Viteri, and C. Kertesz, "Behavior of Joints Using Reinforced Fibrous Concrete," SP 81-6, pp. 125-167.
27. P. R. Gefken and M. R. Ramey, "Increased Joint Hoop Spacing in Type 2 Seismic Joints Using Fiber Reinforced Concrete," ACI Structural Journal, March-April 1989, pp. 168-172.
28. T. Jiuru, "Seismic Behavior And Shear Strength of Framed Joint Using Steel-Fiber Reinforced Concrete," ASCE Structural Journal., Vol. 118, No. 2, Feb 1992, pp. 341-358
29. M. Lakshmi pathy and A. R. Santhakumar, "Experimental Verification of the Behavior of Reinforced Fibrous Concrete Frames Subjected to Seismic Type of Loading," Anna University, India.
30. A. Filiatrault, S. Pineau, and J. Houde, "Seismic Behavior of Steel-Fiber Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints," ACI Structural Journal, September-October, 1995, pp. 543-561.
31. O. Chaallal, S. Thibodeau, J. Lescelleur, and P. Malenfant, "Steel Fiber or Conventional Reinforcement for Concrete Shear Wall?," Concrete International, Vol. 18, No. 6 June 1996, pp. 39-42.
32. N. I. Fattuhi and B. P. Hughes, "Ductility of Reinforced Concrete Corbels Containing either Steel Fibers or Stirrups," ACI Structural Journal, November-December, 1989, pp. 644-651.
33. H. M. S. Hashim, "Strength of Reinforced Concrete Corbels with Fibers," ACI Structural Journal, January-February, 1989, pp. 60-66.
34. N. I. Fattuhi "Column-Load Effect on Reinforced Concrete Reinforced Concrete Corbels," ASCE J. of Structural Eng., Vol. 116, No. 1, Jan. 1990, pp. 188-197
35. N. I. Fattuhi "Reinforced corbels with Plain and Fibrous Concretes," ACI Structural Journal/Sept.-Oct., 1994, pp. 530-536
36. K. S. Soubra, J. K. Wight, and A. E. Naaman, "Fiber Reinforced Concrete Joints for Precast Construction in seismic Areas" ACI Structural Journal, March-April, 1991, pp. 214-221.
37. H. M. S. Abdul-Wahab, "Strength of Vertical Joints with Steel Fiber Reinforced Concrete in Large Panel Structures, ACI Structural Journal, July-August 1992, pp. 367-374.
38. S. D. B. Alexander and S. H. Simmonds, "Punching Shear Rests of Concrete Slab-Column Joints Containing Fiber Reinforcement," ACI Structural Journal, July-August 1992, pp. 425-432.
39. H. Falkner and M. Teutsch, "Comperative Investigations of Plain and Steel Fibre Reinforced Industrial Ground Slabs," 1993, Institut F r Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, No. 102
40. J. W. Spires, J. P. Romualdi, and R. Pichumani, "Analysis of Steel-Fiber Reinforced Concrete Warehouse Floor Slabs," ACI Structural Journal, December, 1977, pp. 616-621.
41. M. A. Al-Ausi, S. A-Salih and A. L. K. Aldouri, "Strength and Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs Subjected to Impact Loading," Fibre Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium, pp. 629-641
42. M. Lakshmi pathy, P. Hariraj, and A. R. Santhakumar, "Flexural Behavior of Prestressed Fibrous Concrete Beams," Proceedigns of the International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, December 16-19, 1987, Madras, India, pp. 2,179-2,191.
43. R. Narayanan, "Torsion, Bending, and Shear in Prestressed Concrete Beams Containing Steel Fibers," ACI Structural Journal, May-June 1986, pp. 423-431.
44. D. C. O'Leary, N. J. Dave, and J. Saunders, "Steel Fibers in Partially Prestressed Composite Concrete Beams," SP 44-27, pp. 477-495.
45. R. J. Craig, J. McConnell, H. Germann, N. Dib, and F. Kashani, "Behavior of Reinforced Fibrous Concrete Columns," SP 81-4, pp. 69-105.
46. R. E. Smith and R. E. Wilde, "Rehabilitating Industrial Floors with SFRC Overlays," Concrete International, June, 1996, pp. 35-38. 