

강섬유를 보강한 슬래브-기둥 시스템의 거동에 관한 연구

The Effects of Steel Fibers on the Behavior of Slab-Column System

최응규*
Choi, Eung-Kyoo

강경수**
Kang, Kyung-Soo

김목한***
Kim, Mook-Han

Abstract

Two-way slab-column specimens were tested under monotonic loading increased up to punching shear failure to investigate the beneficial effects of fiber-reinforced concrete. The parameters for experiments are the placement of fibers within the immediate column region, the placement on the entire surface of the slab, and no placement of fibers. The effects of these parameters on the punching shear capacity, negative moment cracking, and stiffness of the two-way slab specimens were studied. According to the results the addition of steel fibers in the slab around the column results in a significant improvement in the performance including the increase of punching shear resistance, greater post-cracking stiffness and smaller crack width at service load levels.

1. 서론

현재까지 많은 연구결과를 통하여 강섬유를 비롯한 각종 유·무기 섬유류를 콘크리트의 취약한 부분에 보강함으로써 취성재료인 콘크리트에 발생할 수 있는 문제점을 구조적 및 시공적인 측면에서 해결할 수 있다는 것이 많이 알려져 있으며 그 적용범위도 점차 확대되고 있다. Swamy et al^[1]과 Swamy 와 Ali^[2]는 체적비 1%인 소량의 강섬유를 보강한 경우, 콘크리트 부재의 전단내력을 크게 증가시키고 균열을 조절하며 처짐을 줄일 수 있다는 것을 보고하였다. Alexander and Simmonds^[3]는 6개의 슬래브-기둥 접합부 모델실험을 통하여 체적비 0.4%의 섬유를 보강한 경우 플랫-플레이트 슬래

* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원

** 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원

*** 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 주임연구원

브의 전단내력이 최대로 20% 증가하며, 0.8%의 섬유보강에 의해 전단내력이 27% 증가함을 보고하였다. 또한 섬유보강에 의해 연성(ductility)도 상당히 증가함을 보고하였다. Shaaban 와 Gesund^[4]는 13개의 슬래브-기둥 모델의 실험을 수행하여 섬유보강 콘크리트를 사용할 경우 편칭전단내력을 증가시키는데 탁월한 효과가 있다는 결론을 내렸다. Mindess et al^[5]은 240 kg/cm²로부터 960 kg/cm²까지 다양한 강도의 콘크리트에 길이 30mm의 강섬유(long hooked steel fibers)를 1방향 슬래브에 보강하고 실험을 수행한 결과 섬유의 양이 적을 경우 전단강도는 보강된 섬유량에 비례하나 섬유의 양이 체적비 0.5%이상 증가하면 그 효과는 그리 크지않다는 것을 발견하였다.

본 연구에서는 슬래브-기둥 시스템을 대상으로 강섬유보강 콘크리트가 기둥주변의 역학적으로 취약한 부분에 집중 보강된 실험체와 슬래브의 상부피복에만 강섬유가 보강된 실험체, 그리고 보강되지 않은 실험체를 이용하여 강섬유 및 그 보강방법이 슬래브의 균열, 처짐 및 전단내력에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 슬래브-기둥 시스템의 전단거동

2.1 슬래브-기둥 실험체 제작

실험체의 규모와 하중재하방법을 결정하기 위하여 그림 1과 같은 4경간 flat plate-슬래브 시스템을 기본형(prototype)으로 가정하였다. 슬래브는 D.L 120kg/m², L.L 480kg/m²의 사용하중에 대하여 설계하였으며 슬래브의 두께는 150mm(피복두께:25mm), 기둥크기는 225mm×225mm(피복두께: 30mm)로 결정하였다. 기둥단면을 비교적 작게 설계한 것은 전단저항면적을 줄여 편칭전단에 대한 내력이 부족하도록 설계하기 위함이었다. 최종 설계는 ACI 규준에서 요구하는 것 보다 9.5% 큰 휨 내력을 확보하게 하였으나, 편칭전단강도는 요구하는 강도의 66%정도의 강도를 가지게 설계되었다. 이와 같은 기본형구조물에서 주열대(column strip)에 해당하는 2.3m×2.3m 슬래브와 슬래브 표면에서 위아래로 30cm 돌출한 하나의 내부기둥으로 구성된 시스템을 실험체로 제작하였다.

슬래브 콘크리트의 압축강도는 300 kg/cm²이고 기둥에는 800 kg/cm²의 고강도 콘크리트가 사용되었다. 슬래브와 기둥의 콘크리트 배합비는 표 1에 나타나있다. 사용된 철근은 모두 Grade 400 제품이며 실험체 콘크리트 물성은 표 3에 나타나있다. 콘크리트의 압축강도 및 최대응력도는 지름 150mm 높이 300mm 공시체의 압축시험결과로부터 구하였고 휨인장강도(modulus of rupture) f_r 은 길이 600mm, 150mm×150mm 정사각형 단면을 갖는 공시체의 4점휨강도시험(four point flexural beam test)으로부터 구하였다.

사용된 강섬유의 크기는 지름 0.5mm, 길이 30mm이며 인장강도는 12000 kg/cm²이다. 지금까지의 연구결과에 따르면 일정량 이상 보강된 섬유는 구조물의 거동에 큰 영향을 미치지 않으므로 본 연구에서는 체적비로 0.5%의 섬유양만 사용하였다.

실험체는 섬유보강의 방법 및 효과를 알아보기 위하여 강섬유를 기둥 면에서 500mm 떨어진 지점까지만 보강한 모델 (FRS), 슬래브 전체에 인장을 받는 표면에서 40mm 깊이로 보강한 모델 (FRC), 보

강하지 않은 모델 (NSC)등 세 가지로 제작하였다 (그림 2).

2.2 실험체 및 계측장치의 설치

그림 3에 나타난 바와 같이 슬래브-기둥 시스템의 하부기둥을 받침대로 지지하고 슬래브 주변의 여덟 곳에서 집중하중이 가하여지도록 실험체를 설치하였다. 기본형 구조물의 해석결과 변곡점은 기둥 면에서 약900mm 떨어진 곳에서 발생하므로 동일한 모멘트/전단력비를 구현하기 위하여 실험체의 기둥 면에서 887.5mm 위치한 곳에 집중하중을 가하였다. 동일한 유압펌프에 연결된 4개의 유압잭을 사용하여 각각 두 개의 가력점이 있는 네 개의 철재보를 사용하여 총 여덟 개의 지점에 단조증가하중을 가하며 하중을 증가시킬 때마다 처짐과 변형도를 측정하였다. 그리고 몇몇 하중단계에서 균열양상과 균열폭을 기록하였다. 가해진 하중의 크기는 유압잭에 연결된 4개의 로드셀(load cell)을 이용하여 측정하고 각 재하점의 처짐은 LVDT로 측정하였다. 슬래브 하부면에 4개의 LVDT를 설치하여 기둥에 대한 슬래브의 상대처짐을 측정하였다. 이들 네 개의 LVDT는 편칭전단파괴의 시작을 감지하는 데 사용되었다. 슬래브-기둥 실험체의 강체회전(rigid body rotation)을 측정하고 바닥판 작용의 상대적인 기둥거동울 측정하기 위하여 기둥에 세 개의 LVDT가 설치되었다. 또한 전기저항식 변형도 게이지(strain gage)를 양방향의 철근과 슬래브하부 콘크리트 표면에 부착하고 실험체 각부분의 곡률을 측정하였다.

3. 실험결과

실험체에 가해진 총 하중은 여덟 개의 재하점에 가해진 하중, 위험전단주변의 슬래브 자중 그리고 재하장비 무게의 총합으로 구성되었다. 기둥 면에서 $d/2$ 밖에 있는 슬래브와 재하장비의 자중은 2.15ton이며, 실험체의 처짐은 여덟 개의 재하점에서 측정한 값의 평균을 취하였다.

그림 4는 각 실험체의 하중-처짐관계를 나타낸다. 강섬유가 기둥주변의 슬래브 전단면에 보강된 FRS실험체가 가장 큰 최대하중을 보이며 슬래브 상부피복에만 보강된 FRC실험체, 보강되지 않은 NSC실험체 순으로 작아지는 것을 알 수 있다. 수치적으로는 FRS와 FRC가 NSC보다 각각 116kN, 23kN 높은 최대하중을 보였다. 또한 설계하중이 모두 가하여졌을 때의 구조물의 강성도 이와 같은 순서로 나타났다. 마찬가지로 균열이 발생했을 때의 하중도 FRS와 FRC가 NSC보다 각각 21%, 16% 높았다. 그러나 상부철근이 항복을 시작할 때의 하중은 FRC가 FRS보다 약간 높게 나타났다. NSC는 최대하중에 도달한 후 곧 강성을 잃어버리며 붕괴되었으나 강섬유로 보강된 실험체는 어느 정도 강성을 유지하며 붕괴되기 전까지 연성거동을 나타낼 수 있다. 표 4는 각각의 경우에 대하여 중요 하중 단계(초기균열의 발생, 사용하중 재하, 철근의 항복 및 최대하중단계)에서 측정한 하중 및 처짐의 크기를 나타낸다.

강섬유로 보강된 실험체는 보강되지 않은 실험체에 비하여 전단파괴가 기둥에서 멀리 떨어진 곳에서 발생하였으며 전단파괴면적(shear failure surface)또한 보강되지 않은 실험체에 비하여 상당히 중

가하였다. NSC의 전단파괴는 기둥 면에서 슬래브의 유효깊이 d 만큼 떨어진 지점에서 45° 각도로 발생한 반면 FRS의 경우 섬유보강 콘크리트가 사용된 경계인 기둥 면에서 500mm 지점에서 발생하였다. 강섬유가 슬래브의 표면에 보강된 FRC에서는 표면에 발생한 균열이 강섬유의 영향으로 밑으로 진전하지 못하고 최종적인 파괴면은 상부철근이 배근된 면을 따라 수평으로 발생하였다.

그림 5는 설계하중 상태에서 상부철근에 발생하는 변형도를 나타낸다. 예측한 대로 강섬유 보강된 실험체의 변형도가 작았으며 FRC보다 FRS에 발생하는 변형도가 더 작았다.

그림 6, 7, 8은 각 실험체에 대하여 설계하중 상태에서 발생한 슬래브의 균열양상 및 균열의 최대폭을 나타내며 기둥주변(banded region)에 발생한 균열 폭은 NSC의 경우 약 0.8mm, FRS 및 FRC의 경우 각각 0.45mm, 0.6mm 정도이고 그 외의 지역에서는 각각 0.5mm, 0.25mm, 0.4mm로 측정되었다. 따라서 콘크리트 슬래브를 강섬유로 보강하는 것은 균열이 발생하는 것을 지체시키지는 못하나 균열의 폭과 길이가 커지는 것을 억제하는 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

체적비 0.5%의 강섬유를 보강한 슬래브-기둥 시스템 전단 실험을 통해 나타난 구조성능 향상효과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 편칭전단내력이 38%까지 증가하였으며 파괴가 일어난 후 연성과 강성이 증가하였다.
- 2) 사용하중하에서 슬래브에 발생하는 균열폭이 작아지는 효과가 있었다.
- 3) 강섬유의 보강방법 중 기둥주변의 전단면에 강섬유를 보강한 실험체(FRS)가 슬래브 상부피복에만 강섬유를 보강한 실험체(FRC)보다 슬래브의 전단내력증가와 균열억제의 면에서 더욱 우수한 결과를 나타내었다.

참고문헌

- [1] Swamy, R.N., Al-Ta'an, S., Ali, S.A.R., "Steel fibers for controlling cracking and deflection", Concrete International, Vol. 1, No. 8, 1979, pp. 41-49
- [2] Swamy, R.N. and Ali, S.A.R., "Punching shear behavior of reinforced slab-column connections with steel fiber concrete", ACI Journal, 1982, pp. 392-406
- [3] Alexander, S.D.B. and Simmonds, S.H., "Punching shear tests of concrete slab-column joints containing fiber reinforcement", ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 4, 1992, pp. 425-432
- [4] Shaban, A. M. and Gesund, H., "Punching shear strength of steel fiber reinforced concrete flat plates", ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 3, 1994, pp. 406-414
- [5] Mindess, S. Adebar, P. and Henley, J., "Testing of fiber reinforced structural concrete

표 1. 콘크리트 배합비

특성치	보통강도 콘크리트 (300kg/cm ³)	고강도 콘크리트 (800kg/cm ³)
시멘트 (kg/m ³)	355	570*
세골재 (kg/m ³)	790	730
조골재 (kg/m ³)	1040 (20)	960 (10)
총수량** (kg/m ³)	178	143
물/시멘트비	0.50	0.25
감수제	1110	754
소성화제 (ml/m ³)	-	11.97
공기연행제 (ml/m ³)	180	-
슬럼프값 (mm)	146	200
공기량 (%)	8.8	1.5
밀도 (kg/m ³)	2130	2417

* 8~9% 실리카 흙을 함유한 혼화시멘트
 ** 혼화제를 포함한 값

표 4. 하중-처짐 관계

실험체		균열 발생	사용 하중	항복 시작	최대 하중
NSC	하중(kN)	80	214	218	306
	처짐(mm)	1.3	9.9	9.9	17.2
FRS	하중(kN)	97	214	227	422
	처짐(mm)	1.1	8.2	9.0	36.0
FRC	하중(kN)	93	214	242	329
	처짐(mm)	1.3	9.0	10.6	18.2

표 2. 슬래브-기둥 실험체의 콘크리트 특성

실험체	batch	f' _c (kg/cm ²)	ε' _c × 10 ⁻⁶	f _r (kg/cm ²)
NSC	슬래브층	300	2620	32.6
	표준편차	9	152	2.4
FRS	슬래브층	390	2436	31.2
	표준편차	3	69	2.2
FRC	슬래브층	375	1981	30.1
	표준편차	6	74	0.8

표 3. 철근의 물성

종 류	면적 mm ²	f _y kg/cm ²	ε _y kg/cm ²	ε _{sh} %	f _u kg/cm ²	기 능
No.10	100	4540	0.34	0.43	6760	하부 철근 & 기둥 늑근
No.15	200	4340	0.24	1.95	5960	상부 철근 & 기둥 주근

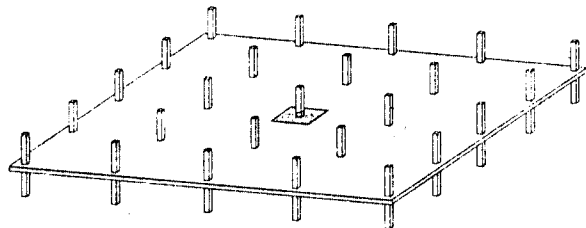


그림 1. 실제 평판 구조물

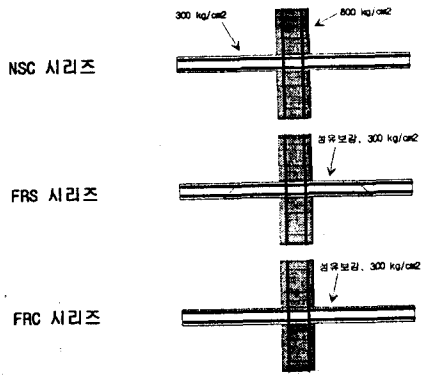


그림 2. 실험체 유형

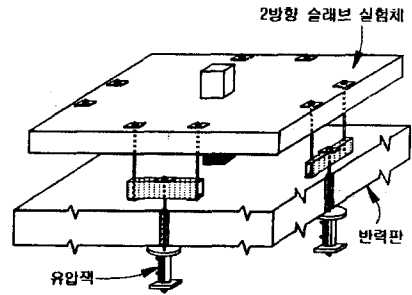


그림 3. 슬래브-기둥 시스템의 실험준비

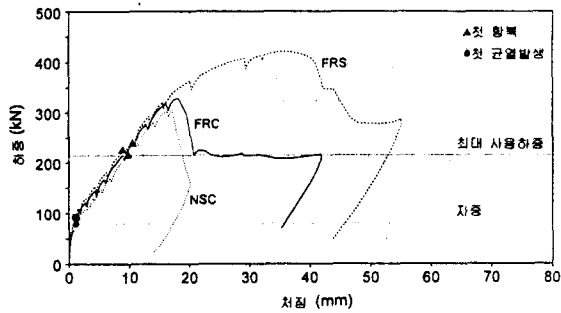


그림 4. 슬래브-기둥 시스템의 하중-처짐 곡선

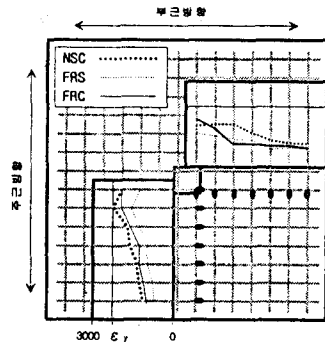
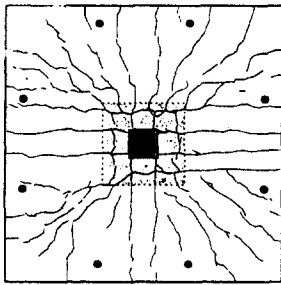
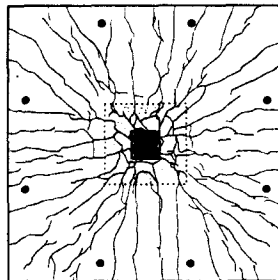


그림 5. 상부철근에 발생하는 변형도



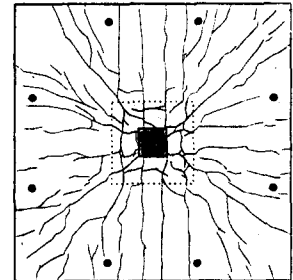
최대균열폭 : 기둥주변내 = 0.80 mm
기둥주변외 = 0.50 mm

그림 6. NSC 실험체 슬래브의 균열양상 및 최대 균열폭



최대균열폭 : 기둥주변내 = 0.45 mm
기둥주변외 = 0.25 mm

그림 7. FRS 실험체 슬래브의 균열양상 및 최대 균열폭



최대균열폭 : 기둥주변내 = 0.60 mm
기둥주변외 = 0.40 mm

그림 8. FRC 실험체 슬래브의 균열양상 및 최대 균열폭