

강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨성능 평가

Evaluation of Flexural Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams

하 기 주*

신 종 학**

주 정 준***

Ha, Gee-Joo

Shin, Jong-Hack

Ju, Jung-Jun

Abstract

In this experimental program specimens, designed by the test variables, such as percentage of steel fiber incorporated, were constructed and tested to evaluate the flexural performance of reinforced steel fiber concrete beams. Based on the test results reported in this study, the following conclusions are made.

Comparing with the load-displacement relationship of standard specimen, specimen over 0.5% of steel fiber incorporated, could be improved significantly flexural performance, such as capacity, ductility, and crack pattern.

As increasing in quantity of steel fiber incorporated(0.5%~2.0%), the flexural strength of each specimen was shown the enhancement of 13%~40% in comparison with the standard specimen BSS.

Keywords : Steel Fiber, Reinforced Concrete Beam, Flexural Performance, Ductility
Crack Pattern, Evaluation

1. 서 론

각종 건설구조물이 대형화되고 다양화됨에 따라 콘크리트에 대한 성능의 고도화가 요구되었고, 기존 콘크리트의 결점이 취성재료라는 점과 휨이나 인장 응력에 취약하다는 점에서 이러한 특성을 개선하기 위하여 높은 인장강도와 높은 탄성율을 가진 섬유질

재료로 보강하고자 하였다.

강섬유보강 콘크리트는 단면이 작고 길이가 짧은 강섬유를 수화성의 시멘트와 세골재의 배합이나 수화성의 시멘트, 세골재, 조골재의 배합에 임의로 투입·분산시켜 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 연성, 내충격성 등의 개선을 목적으로 만든 합성재료이다. 강섬유의 혼입으로 모르타나 콘크리트

* 경일대 건축공학과 부교수, 공학박사

** 경일대 건축공학과 교수, 공학박사

*** 경일대 대학원 졸업, 강사

●본 논문에 대한 토의를 2000년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2000년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

의 급격한 충격강도 및 인성의 공학적 성능을 개선시킬 수 있게 되었고, 휨강도 및 피로강도를 향상시키며, 강섬유가 내부 균열 진전을 구속하기 때문에 균열발생에 대한 저항성을 가지게 된다.

기존의 보통콘크리트에 비하여 강도 증진 및 특히 우수한 연성을 확보하는 강섬유보강 콘크리트를 건축 및 토목 구조물에 적용하기 위한 구조체에 대한 실험 및 이론연구⁽¹⁻³⁾도 재료 자체에 대한 연구와 병행하여 꾸준히 지속되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 강섬유를 혼입하였을 경우의 철근콘크리트 보의 균열강도, 인장강도, 휨강도, 균열폭 및 균열간격, 연성등을 비교·분석함으로써 강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨성능을 평가하고 개선하는 데 그 목적이 있다.

2. 강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨성능 실험

2.1 실험계획

강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨성능을 평가하고 부재의 역학적 거동특성에 관한 강섬유의 보강효과를 규명하기 위하여 기존실험체(BSS) 및 강섬유 혼입율의 변화(V_f : 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0%)에 따라 Table 1 및 Fig. 1과 같이 6개의 1/3축소모델 실험체를 제작하였다.⁽¹⁻²⁾

2.2 콘크리트 배합설계 및 사용재료 특성

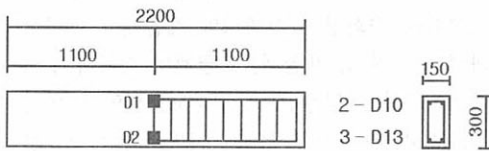
본 연구에서 사용한 콘크리트는 재령 28일 압축강도가 240kgf/cm²이 되도록 배합하였고, 시멘트는 국내산 제1종 포틀랜드시멘트와 최대 골재크기가 25mm인 강자갈을 사용하였으며, 콘크리트의 배합설계는 Table 2와 같다.

Table 1 실험체의 종류와 특성

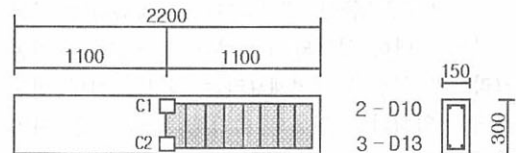
구분 실험체종류	실험체명	단면(cm)		강섬유 혼입량 (%)	고성능 감수제 (%)	철근(mm)		길이 (cm)
		폭(b)	춤(D)			인장철근	압축철근	
기준 실험체	BSS	15	30	0	0	3-D13	2-D10	220
강섬유보강 실험체	BSFS0.5	15	30	0.5	0.5	3-D13	2-D10	220
	BSFS0.75	15	30	0.75	0.5	3-D13	2-D10	220
	BSFS1.0	15	30	1.0	0.5	3-D13	2-D10	220
	BSFS1.5	15	30	1.5	1.0	3-D13	2-D10	220
	BSFS2.0	15	30	2.0	1.0	3-D13	2-D10	220

Table 2 콘크리트 배합표

시멘트 (kgf/m ³)	물 (kgf/m ³)	잔골재 (kgf/m ³)	굵은골재 (kgf/m ³)	혼화제 (%)	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	슬럼프 (cm)
408.5	195.8	821	976.8	-	48	35.2	12



(a) 기준실험체 BSS



(b) 강섬유보강 실험체 단위: mm

주): ■ : 철근 변형계이지 □ : 콘크리트 변형계이지

(V_f : 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0%)

Fig. 1 강섬유보강 철근콘크리트 보 실험체의 상세도

보통콘크리트 및 강섬유보강 콘크리트의 재령별 압축강도는 Table 3과 같으며, 실험체 제작에 사용된 철근은 SD40인 국내산 D10, D13을 사용하였다. 철근의 인장시험 결과는 Table 4와 같다.

Table 3 강섬유보강 콘크리트의 압축강도(kgf/cm²)

재령 혼입율	3일	7일	28일
0	134	172	253
0.5	168	198	266
0.75	177	207	279
1.0	205	235	306
1.5	233	277	343
2.0	265	293	409

Table 4 철근의 역학적 성질

호칭	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
D13	4,520	6,430	2.04×10 ⁹
D10	5,250	7,360	1.95×10 ⁹

본 실험체 제작에 사용된 강섬유는 국내 C사에서 생산되었으며 단면이 원형으로 양단 갈고리(Hook)형의 치수가 $\phi 8 \times 50\text{mm}$ 로 강섬유가 각각 분리된 것을 사용하였다. 강섬유의 형상 및 크기와 물리적 특성은 Fig. 2 및 Table 5와 같다.

2.3 실험장치 및 실험방법

본 연구에서의 하중재하는 100tonf 용량의 유압

Table 5 강섬유의 역학적 성질

구분	SIZE (mm)	형상비 (L/d)	비중	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
강섬유 (갈고리형)	0.8×0.8 ×50	62.5	7.85	2,380	3,400	1.8×10 ⁹

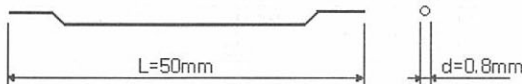


Fig. 2 강섬유의 형상

잭을 사용하여 Fig. 3에서와 같이 3등분점으로 지간 중앙점에서 재하하였으며, 극한하중에 도달할때까지 0.05mm간격으로 변위를 제어하며 가력하였다. 변위계를 사용하여 각 실험체의 지간 중앙의 실험체 하단면에서 각 하중 단계별 하중-처짐량을 측정하였으며, 철근과 콘크리트의 변형도는 변형게이지(strain gauge : 5mm, 60mm)를 주근과 콘크리트 외면의 상·하부면(각1개)에 부착하여 측정하였다. 이에 따른 측정값들은 시스템 4000과 PC를 사용하여 자동으로 처리하였다.

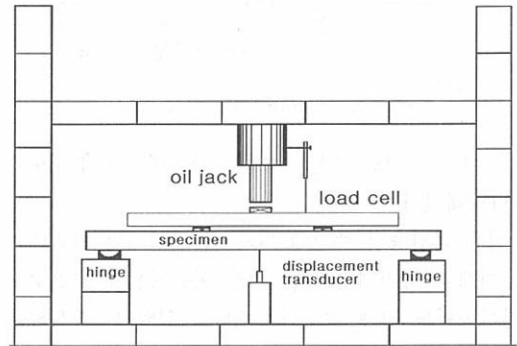


Fig. 3 실험체의 설치 및 가력장치

3. 강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨거동에 대한 구조성능 평가

3.1 하중-처짐 특성

강섬유 혼입율에 따른 강섬유보강 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하기 위하여 기존의 설계개념에서 건교부기준에 따른 전단보강근을 배근하였으며, 강섬유를 보강함으로써 강섬유보강 철근콘크리트 보의 구조성능을 발휘할 수 있는 적절한 설계를 도모하기 위하여 강섬유 혼입율(V_f : 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%)의 변화에 따른 실험체를 제작하여 실험을 실시하였다.

강섬유 혼입율에 따른 강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨성능을 평가하기 위하여 강섬유 혼입율에 따른 각 실험체의 하중-변위곡선을 비교하여

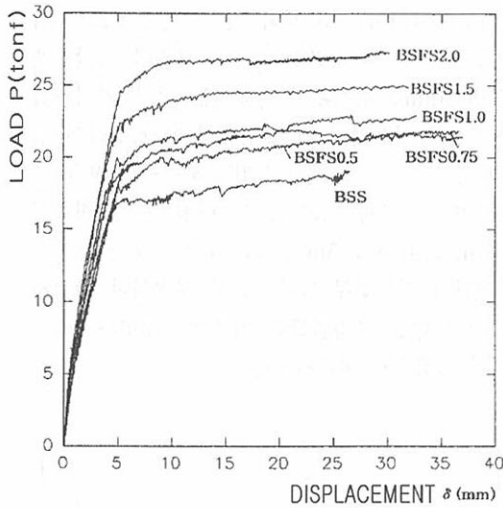


Fig. 4 각 실험체의 하중-변위 특성 비교

Fig. 4에 나타내었으며, 최대내력 및 변위를 Table 6에 나타내었다.

강섬유 혼입율의 증가에 따라 각 실험체의 최대내력은 대체로 증가하였으며, 하중-변위곡선을 고찰하면 연성능력이 크게 향상됨을 알 수 있었고, 강성의 증가는 콘크리트내에서 섬유유 혼입의 균열성장 억제작용으로 인하여 부재의 유효단면적이 증가하기 때문에 일어나며, 섬유혼입율이 증가할수록 부재의 강성은 더 많이 증가하였다 또한 부재의 휨이섬은 섬유유 혼입한 경우에 증가하는데 섬유혼입율이 증가할수록 더 많이 증가하였다. 강섬유보강 철근콘크리트 보의 경우 강섬유의 혼입율이 증가할수록 최대내력, 강성, 휨인성 및 연성능력의 향상 등으로 인해 구조성능이 크게 개선되는 것으로 판단된다.

3.2 파괴형태

강섬유 혼입율에 따른 강섬유보강 철근콘크리트 보의 파괴형태를 고찰하기 위하여 하중단계별 균열진전 상황과 최종 파괴시의 파괴형태를 Fig. 5에서와 같이 나타내었다.

강섬유보강 철근콘크리트 보에서는 휨파괴형태의 연성적인 파괴형태를 나타내고 있음을 비교·평가할 수 있었다. 그리고 강섬유 혼입율에 따른 각 실험체의 파괴형태는 Table 6과 같다.

3.3 하중-변형도 특성

강섬유보강 철근콘크리트 보 실험체의 재하에 따른 철근 및 콘크리트의 변형도를 측정하기 위하여 실험체 중앙 상부 및 하부 철근에 철근용 스트레인 게이지(D1, D2)를 부착하였고, 실험체 중앙 상부 및 하부 콘크리트 표면에 콘크리트 스트레인게이지(C1, C2)를 부착하여 실험중 재하단계별 콘크리트 및 철근의 변형도를 분석하여 재하단계별 휨성능 평가 및 항복여부를 검토하였다.

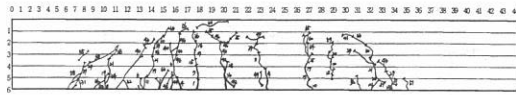
강섬유보강 철근콘크리트 보 실험체는 휨에 의한 철근의 항복으로 인한 인장파괴를 유도하도록 제작되었다. Fig. 6 및 Fig. 7에서와 같이 하중 증가에 따른 인장철근(D2)의 변형도-변화에서 알 수 있듯이 극한하중 가력시 모든 실험체에서 보의 인장측 연단에 부착한 철근의 변형도가 항복변형도를 초과함을 나타내고 있다. 이러한 현상은 실험체의 설계 개념인 인장철근의 항복으로 인한 파괴형태를 보여 주고 있다.

Table 6 각 실험체별 실험결과

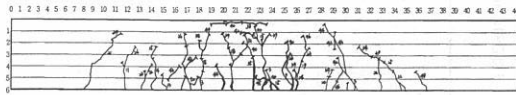
실험체명	강섬유 혼입율(%)	전단철근(mm)	δ_{max} (mm)	V_{max} (tonf)	파괴형태
BSS	0	D10@125	26.03	19.1	휨
BSFS0.5	0.5		29.86	21.6	휨
BSFS0.75	0.75		29.97	21.75	휨
BSFS1.0	1.0		26.64	22.95	휨
BSFS1.5	1.5		29.64	24.95	휨
BSFS2.0	2.0		29.57	27.35	휨

주) V_{max} : 단조하중 작용시 각 실험체의 최대내력(tonf)

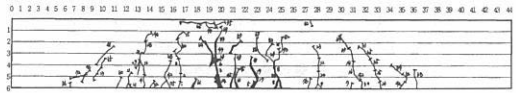
δ_{max} : 단조하중 작용시 각 실험체의 최대내력시의 보의 중앙점 처짐(mm)



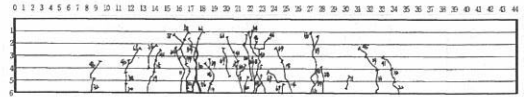
(a) 기준실험체 BSS



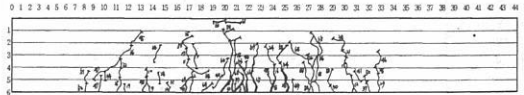
(c) 실험체 BSFS0.75



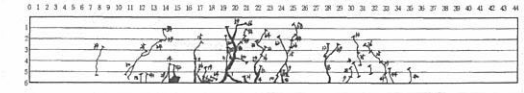
(e) 실험체 BSFS1.5



(b) 실험체 BSFS0.5



(d) 실험체 BSFS1.0



(f) 실험체 BSFS2.0

Fig. 5 각 실험체의 파괴형태

3.4 균열특성

1) 균열폭⁽⁴⁾

철근콘크리트 부재의 균열폭은 철근의 응력과 비례적으로 증가한다는 사실은 기존의 여러 연구에서 밝혀져 왔다. 균열폭의 측정은 0.01mm까지 측정가능한 광학현미경으로 측정하였으며, 실험에서 얻은 균열폭과 철근응력의 변화도 거의 비례적인 관계를 보였고, 여기서 철근의 응력은 측정된 철근의 변형

도에 철근의 탄성계수(E_s)를 곱해서 얻었다. 각 실험체의 균열폭은 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보듯이 섬유를 혼입한 부재는 같은 철근 응력에 대해서 균열폭이 더 작게 나타났으며, 섬유의 보강효과는 섬유혼입율이 증가할수록 더 크게 나타났다. 이와 같이 섬유의 보강으로 인해서 균열폭이 감소하는 것은 균열단면에서 균열면에 직각방향으로 섬유의 교량역할로 인해서 균열폭의 확산이 억제되기 때문이다. 이때, 강섬유는 매트릭스와의 부착에 의해서 지지된다.

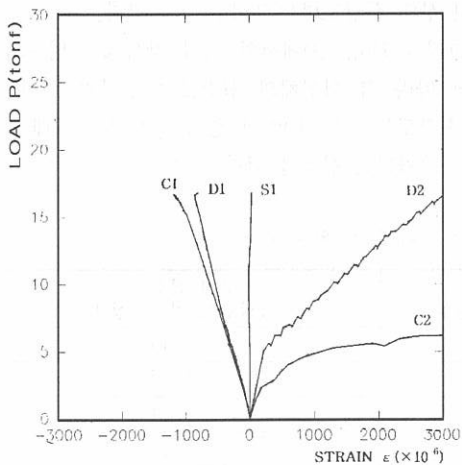


Fig. 6 실험체 BSS의 하중-변형도 관계

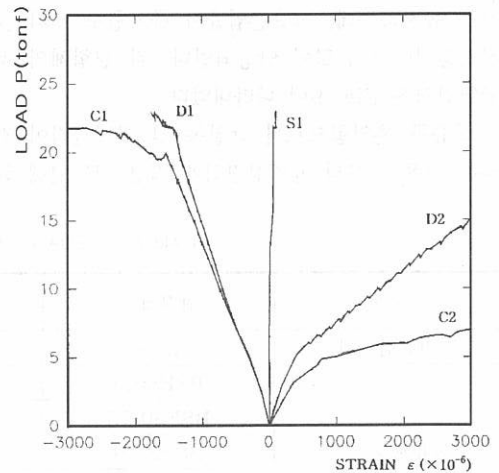


Fig. 7 시험체 BSFS1.0의 하중-변형도 관계

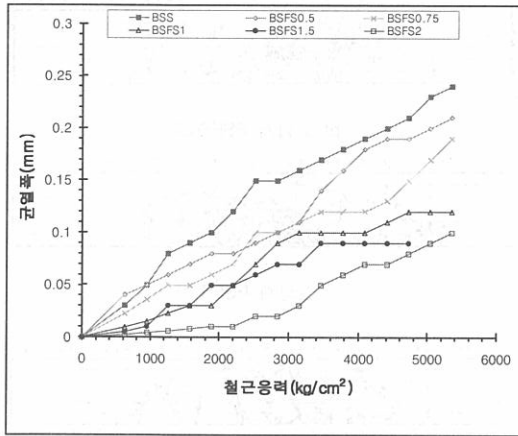


Fig. 8 각 실험체의 균열폭 관계

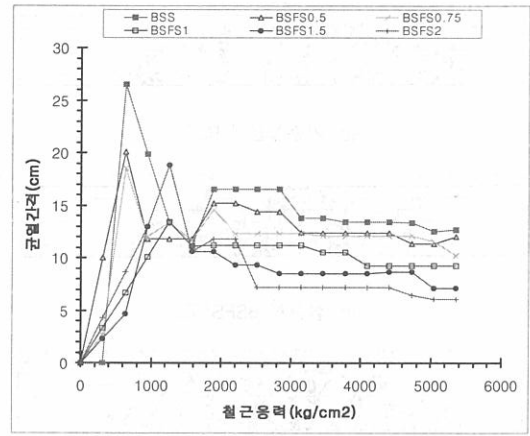


Fig. 9 각 실험체의 평균균열간격 관계

강섬유를 혼입하였을 때의 균열폭은 대체로 감소하였으며, 섬유혼입율이 증가할수록 균열폭의 성장억제에 대한 강섬유 혼입의 효과가 크게 나타났다.

2) 균열간격

강섬유보강 철근콘크리트 보 실험체의 철근응력에 대한 평균균열간격의 관계는 섬유를 혼입한 실험체의 경우가 균열간격이 작게 나타났으며, 섬유혼입율이 증가할수록 균열간격이 더 많이 감소하였다. 균열간격은 하중이 어느정도 증가하면 안정된 균열간격을 유지하는데, 섬유혼입율이 증가할수록 더 높은 철근응력에서 균열이 안정되었다. 각 실험체의 평균 균열간격은 Fig. 9에 나타내었다

섬유를 혼입함으로써 균열폭 및 균열간격이 감소하는 것은 섬유의 균열성장억제 작용으로 인해 균열

의 확산이 방지되어 새로운 미세균열(Microcrack)이 생성되기 때문이다. 일반적으로 철근콘크리트 구조물에서의 균열은 철근의 부식, 누수등과 관계되기 때문에 균열폭의 제한은 중요하다. 그러므로 섬유의 혼입은 철근콘크리트 구조물의 균열폭을 제한하는데 유효한 것으로 사료된다.

3.5 휨강도의 평가 및 개선⁽⁵⁻⁶⁾

강섬유보강 철근콘크리트 보 실험체의 실험을 통하여 최대 휨모멘트와 전단보강된 기준실험체 BSS와의 상대 휨강도비는 Table 7과 같다.

그리고 Fig. 10에서와 같이 강섬유 혼입율의 증가에 따라 각 실험체의 휨강도는 증가하였으며, 상대 휨강도는 13~40%의 증가를 보이며 최대 43%까지 증가되는 현상을 나타내었다.

Table 7 각 실험체의 파괴시의 휨강도와 상대 휨강도의 비교

구분	실험체명	실험값 M_{exp} (tonf·m)	상대 휨강도비 (실험체/기준실험체)
기준실험체	BSS	3.18	1.00
강섬유보강 실험체	BSFS0.5	3.60	1.13
	BSFS0.75	3.63	1.14
	BSFS1.0	3.83	1.20
	BSFS1.5	4.16	1.31
	BSFS2.0	4.56	1.43

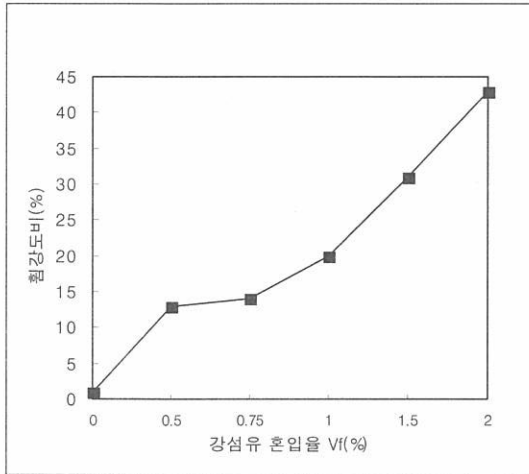


Fig. 10 각 실험체의 상대 휨강도의 비교

4. 결 론

철근콘크리트 구조물의 균열, 과하중 등으로 구조체의 성능이 저하되고 구조물의 대형화와 다양화됨에 따라 신소재의 보강을 통한 구조체의 사용성 및 구조성능 개선을 위한 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 강섬유를 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하고 기준실험체(BSS) 및 강섬유 혼입율(V_f : 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%)에 따른 구조성능 평가를 위하여 실험체를 제작하고 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전단보강된 철근콘크리트 보에 강섬유를 0.5% 이상 혼입한 강섬유보강 철근콘크리트 보의 경우 기준실험체 BSS와 하중-변위곡선을 비교하여 보면 내력 및 연성능력의 향상 등 구조성능이 크게 개선되었으며, 특히 실험체 BSFS 1.5의 경우 기준실험체에 비하여 내력이 31%향상되었다.

(2) 강섬유보강 철근콘크리트 보의 파괴형태는 가력시 인장철근의 항복에 의한 전형적인 휨 파괴형태의 연성적인 파괴형태를 나타내고 있음을 고찰할 수 있었다.

(3) 강섬유보강 철근콘크리트 보의 동일수준의 재하시 균열폭을 비교한 결과 섬유혼입율이 증가할 수 균열폭은 대체로 감소하였고, 특히 균열폭의 성

장억제에 대한 강섬유 혼입의 효과가 큰 것으로 나타났다. 또한, 철근이 항복에 도달한 경우 실험체 BSFS2.0 및 BSS에 발생한 균열폭은 각각 0.07mm, 0.19mm로 나타났다.

4) 강섬유혼입 실험체의 평균균열간격의 관계는 기준실험체 BSS에 비하여 평균균열간격이 작게 나타났다. 또한, 강섬유 혼입율이 증가할수록 평균균열간격이 더 많이 감소하였다.

5) 강섬유 혼입율의 증가(0.5%~2.0%)에 따라 각 실험체의 휨강도는 점점 증가하였으며, 상대 휨강도는 기준실험체 BSS에 비하여 13%~40% 증가를 보이며 최대 43%까지 증가되는 현상을 나타냈다.

참 고 문 헌

1. 하기주 외 3인, "강섬유보강 초기재령 철근콘크리트 보의 전단성능 개선에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권 2호 1999. 4. pp.135-140.
2. 하기주 외 3인, "초기재령 강섬유보강 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 및 개선", 한국구조물 진단학회논문집, 제3권 3호 1999. 7.
3. 이차돈 외 2인, "강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨 거동", 대한건축학회 논문집, 제11권 5호 1995. 5. pp.151-161.
4. 오병환, "강섬유를 혼입한 철근콘크리트부재의 휨 거동에 관한 이론 및 실험 연구" 한국 콘크리트학회지, 제3권 3호 1991. 9. pp.129-139.
5. Romualdi J. P. and Mandel J. A. "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Space Short Length of Wire Reinforcement", *ACI, Journal Proceedings*, V. 61, NO. 6, June. 1964, pp.657-672.
6. Henager, Chales H, and Doherty, Terrence J, "Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams." *Proceedings, ASCE*, Vol.12, ST-1, pp.178-188.

(접수일자 : 2000. 1. 27)