

강섬유 보강 철근 콘크리트 단순보와 연속보의 거동

The Behavior between Steel fiber Reinforced Concrete Both Simple and Continuous Beams

곽계환* 김원태** 김기순*** 장화섭***
Kwak, Kae-Hwan Kim, Won-Tae Kim, Ki-Soon Jang, Hwa-Sup

ABSTRACT

It is absolutely natural to be interested in durability and safety of the structure under shear behavior. To fulfill this desire, a comparison on the shear behavior between steel fiber reinforced concrete both simple and continuous beams is done to use in the field working. Several operations are conducted : First of all, plan for optimal combination is standardized. Second, resistance for shear has been generalized in that it is decided by combination of individual elements. Third, as the fracture of tensile bar leads to destruction of specimen, shear behavior of whole specimen is decided by stress working on tensile bar. It should be generalized for other specimens also. Forth, evidence of the softness of steel fiber reinforced concrete beam by experiment lead to application in the fields. Finally, numeral values of the steel fiber reinforced concrete are analyzed and the result is compared to those of experiments.

With these consequences, this study was done for the application to dynamic structures such as bridges and the repair and rehabilitation.

1. 서 론

철근콘크리트 교량 구조물에서 통과하중의 증대와 교통량의 증대로 교량 구조물의 균열상태와 처짐이 커지고 있다. 특히, 교량구조물은 계속되는 반복하중을 받게 되므로 사용조건에 대한 균열발전은 구조물의 강성을 감소시키고 처짐이 증가하는 현상을 가져오게 된다. 이런 사용성의 문제를 간과하게 되면 급기야 콘크리트 구조물의 심각한 문제가 될 수 있다. 콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 심각한 구조적 문제를 발생시킬 수도 있으며, 내구성의 저하와 외관의 손상은 물론, 균열로 인해 철근이 습기에 노출될 경우, 부식이 발생할 수 있다. 콘크리트에 균열을 발생시키는 요인은 다양하나 일반적으로 구조물에 가해지는 하중 및 콘크리트의 부피변화로 인한 인장응력의 발생이 부식의 원인이다.

특히, 콘크리트와 같이 취성파괴를 일으키는 재료의 경우 균열발생 후 반복하중에 의하여 균열선단에 응력

* 정회원 원광대학교 토목환경공학과 교수
** 정회원 원광대학교 토목환경공학과 박사과정
*** 정회원 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

집중이 발생하게 되며, 이러한 응력집중으로 인하여 균열은 급격히 진행하게 되어 파괴에 이른다. 철근콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도는 상대적으로 작으므로 인장강도의 증진과 균열제한을 위해 많은 연구가 수행되고 있다. 강섬유가 균열발생을 억제함은 물론 균열발전 후에도 균열 폭을 억제함으로써 하중전달 능력을 향상시키는 데 효과가 있어 일반적인 철근콘크리트보다 강섬유 보강 철근콘크리트는 사용성에 대하여 우수한 성능을 갖고 있다.

본 연구에서는 강섬유를 보강한 철근 콘크리트 단순보와 2경간 연속보의 정적거동에 대해 실험 값과 수치해석의 결과 값을 비교, 검토하였다. 수치해석은 Von-Mises의 항복이론을 내포한 유한요소 해석 프로그램인 VisualFEA을 이용하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료 및 배합설계

2.1.1 사용재료

강섬유를 혼입한 콘크리트의 배합설계를 위하여 국내 D사 제품인 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 비중이 2.62, 조립율이 2.73인 잔골재를 사용하였다. 또한 굵은 골재의 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, pH8.0인 PowerCon-100을 사용하였으며, 본 실험에 사용된 강섬유는 벨기에 D사의 제품으로서 양단 흑크형을 사용하였고 비중은 7.85이며 형상 비는 $80(=60/0.75)$ 이었다. 사용된 강섬유의 종류 및 물리적 성질은 표.1과 같다.

표.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

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 표.2와 같은 배합설계를 도출하였다.

표.2 Mix proportion

Series	Max. Size (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Volume (kg/m ³)					V_f
						W	C	S	G	SP (g/m ³)	
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

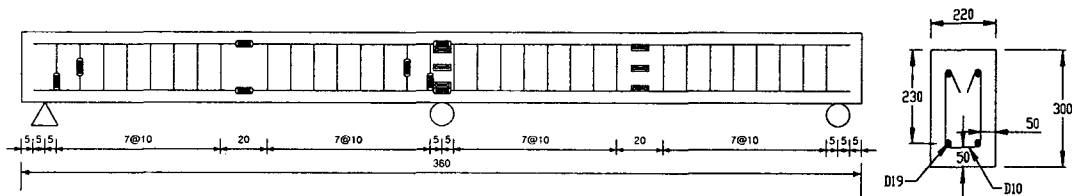
표.3 Test results of compressive and splitting tensile strength

Series	Compressive strength (f_{ck}) kgf/cm ²		Tensile strength (f_{sp}) kgf/cm ²		f_c/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

강섬유를 혼입한 콘크리트의 압축강도와 쪼갬 인장강도를 측정하기 위하여 강섬유의 형상비가 30이상이므로 (=15×30cm의 몰드를 사용하였으며 압축강도는 KS규정에 따라 실험을 실시하였고 같은 규정에 따라 쪼갬 인장강도 실험을 실시하였다. 그 결과는 표.3과 같다.

2.2 시편 제작

본 연구에서 제작된 시편은 콘크리트 구조설계기준에 따라 강도설계법에 의한 시편설계를 실시하였다. 시편은 1모멘트 부의 인장파괴를 유도하기 위하여 전단보강을 100% 실시하였고, 단순보와 연속보는 각각 15×30×190cm 및 15×30×360cm의 크기로 각 혼입을 별로 시편을 제작하였다. 하중에 따른 철근의 변형율을 측정하기 위하여 인장 압축철근 및 전단보강철근에 스트레인 게이지를 부착하였으며 경간 중앙부의 처짐을 측정하기 위해 LVDT를 설치하였다. 또한 단면의 중립 축변화를 파악하기 위해 매립형 콘크리트 게이지를 설치하였다. 연속보 실험부재의 치수 및 스트레인 게이지의 부착위치는 그림.1과 같다.



☐ : Steel strain gauge, ◻ : Concrete mold gauge

그림.1 Shape of test beams and loading arrangement (Plane unit : cm, Section unit : mm)

표.4 Detail test specimens

Series	f_c (kg/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

정적실험은 50tonf(Stroke=±150mm) 용량의 MTS 유압식 액츄에이터를 이용하여 실시하였다. 정적실험은 KS F 2403, JIS A 1106 및 KSF 2408의 규정에 의해 매분 1,666~2,070kgf의 하중을 가하여 하중제어방식으로 실험하였다.

2.3.2 측정방법

실험에 앞서 모든 시편은 백색 페인트를 도포한 후 표면에 10cm간격으로 가로줄과 세로줄을 그어 콘크리트 균열 성장 과정을 측정할 수 있도록 하였다. 정적실험은 보의 처짐을 측정하기 위해 각 경간의 중앙부에 LVDT를 설치하였고 시험체 내부에 설치한 철근 변형을 게이지와 콘크리트 변형을 게이지로 변형율을 MTS 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정적실험

3.1.1 단순보의 하중과 처짐 및 변형률 관계

하중과 처짐의 관계는 하중이 증가함에 따라 처짐은 비교적 일정하게 증가하였으나, 22(ton)에서 27(ton)으로 하중이 증가될 때 처짐이 급격히 증가하였다. 부재의 강성감소는 부재가 파괴단계에 이르렀음을 나타내는 것이며, 부재는 27.5(ton)에서 파괴되었다. 즉, 부재는 초기균열에 파괴되지 않고 후 균열에 더욱 많은 중앙 처짐이 있어 연성적 임을 알 수 있었다.

하중과 변형률의 관계는 하중 1(ton)씩의 증가에 따른 균열성장과 변형률을 확인토록 하였다. 부재 IAS2인 경우는 13.6(ton)에서 휨초기균열이 일어나고 17(ton)에서 전단초기균열이 일어나는 현상을 알 수 있었다. 스티럽의 변형률은 사인장균열의 발생과 밀접한 관계에 있으며 휨균열과는 거의 무관한 것으로 나타났다. 단순보의 하중과 변형률 및 중앙처짐 관계곡선은 그림 2, 3과 같다.

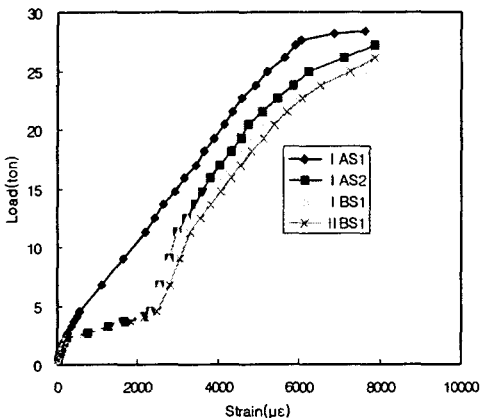


그림.2 Stress(Load)-Strain Curve

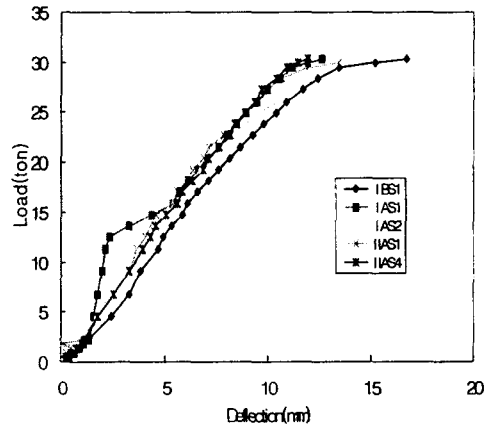


그림.3 Stress(Load)-Deflection Curve

3.1.2 연속보의 하중과 처짐 및 변형률 관계

그림.4에서 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. 연속보의 정적실험 결과는 다음 표. 5와 같다.

표.5 Results of static test

Name of beams	f_c (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_c : 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

시편의 변형률은 철근에 부착한 스트레인 게이지(Steel strain gauge) 이용하여 측정하였다. 정모멘트 발생부에서 하중과 인장철근 변형을 관계는 그림. 5에서 보는 바와 같이 초기 휨균열이 발생되기 전까지는 선형적으로 증가하다가 균열이 발생되어 보의 강성이 적어지는 상태부터 약간의 기울기를 가지고 다시 선형적으로 증가하는 모습을 볼 수 있다. 강섬유를 보강하지 않은 시편인 RC 1은 강섬유가 보강된 SFRC-시리즈의 시편보다 낮은 하중에서 철근의 항복강도에 도달하고 동시에 큰 변형률을 보이며 파괴되었다. 반면에 강섬유를 혼입한 시편인 SFRC-시리즈는 철근의 항복강도에 도달하여 큰 변형률을 보이다가 시편에 혼입된 강섬유가 미세균열을 제어하는 동시에 균열사이에서의 진전을 제어하여 추가적인 하중을 받더라도 변형률이 감소하는 것을 알 수 있으며 이는 시편에 혼입된 강섬유가 철근의 항복강도 이후에도 구조체로서의 기능을 상실하지 않도록 보강효과를 충분히 발휘하고 있음을 말해준다.

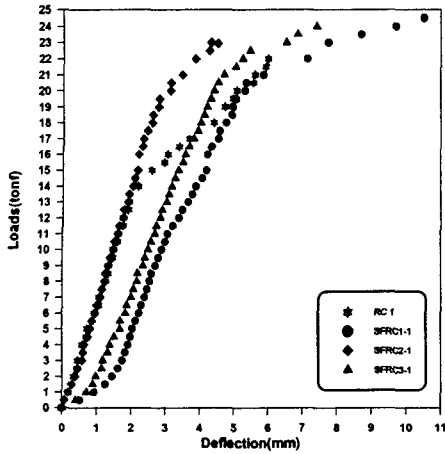


그림.4 Stress(Load)-deflection curve of static test

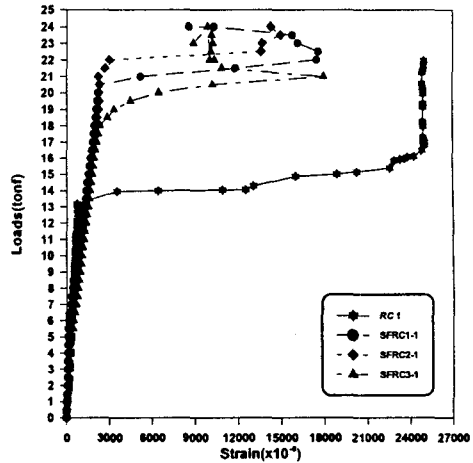


그림.5 Stress(Load) vs positive moment section tensile steel strain of static test

3.1.3 하중증가에 따른 단순보와 연속보의 균열성장과 파괴양상

단순보의 균열성장은 재하 초기에는 순수 휨 구간에서 인장균열이 발생하여 미세하게 발전하다가 하중을 증가시키에 따라서 사인장균열이 발생하였다. 하중의 증가와 함께 사인장균열은 위와 아래 방향으로 진전을 계속하여 결국 극한 하중에서의 파괴되는 사인장균열에 의한 전단파괴의 양상을 나타내었으나, 휨균열은 어느 정도 수준에서 진전이 멈추었으며, 파괴에 미치는 영향은 거의 없었다.

사인장균열은 하중의 증가에 따라서 어느 중간에 이르러 사인장균열이 발생하였다. 이러한 사인장균열은 하중의 증가에 따라서 스테럽이 없는 경우에는 재하점 방향과 지지점 방향으로 약 45°의 경사로서 발전되었다. 이때 전단 균열 하중과 극한 전단하중은 섬유의 함유량에 따라서 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있었다.

스테럽을 포함한 보의 경우에도 좌와 우 거의 같은 모양으로 균열이 발생하였는데 각각의 경우 스테럽과 스테럽의 사이에서 거의 45° 경사로 서너 군데씩 균열성장이 발전되었다. 균열성장 과정에서 가장 윤곽이 뚜렷한 곳은 지지 점에서 2/3 만큼 떨어져서 재하점을 향하는 사인장균열이다.

하중의 증가에 따른 부재의 균열 발생과정은 그림.6, 7과 같다.

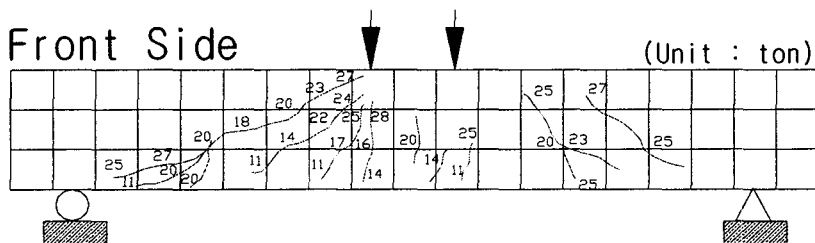


그림.6. I AS1 균열도

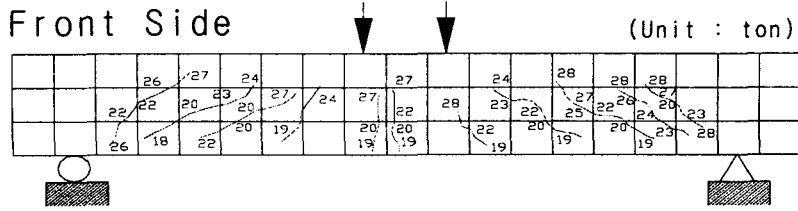
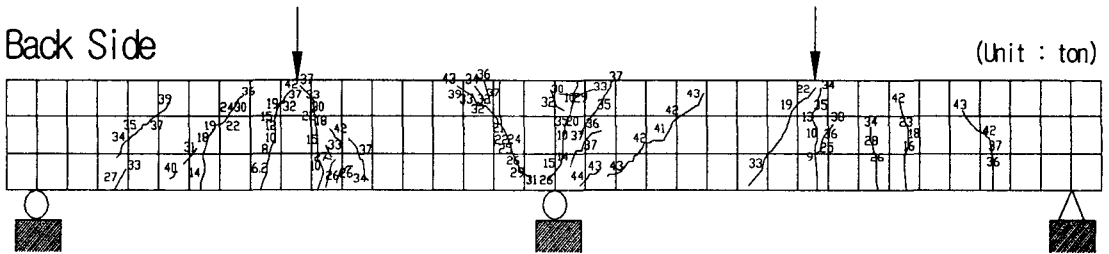
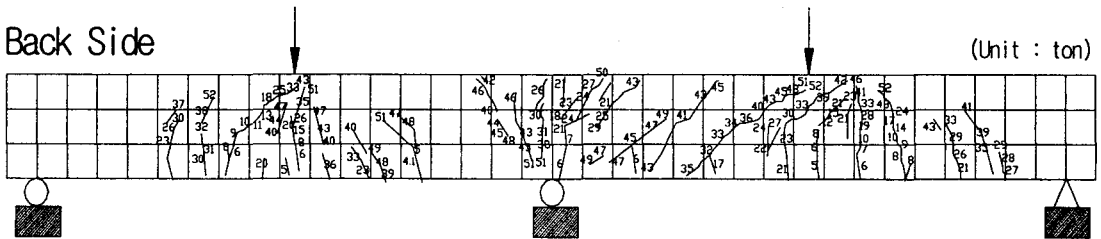


그림7. IBS1 균열도

2경간연속보의 파괴양상은 전단보강철근의 영향으로 강섬유 혼입에 관계없이 힘과파괴가 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 어느 정도 균열진전 제어의 효과가 있었으며 시편이 파단될 때 강섬유 자체가 파단 되는 것이 아닌 뿔힘에 의해 파괴되었다. 그림.8에 RC 1과 SFRC 1-1에 대한 균열성장 및 파괴양상을 나타내었고, SFRC2, 3-시리즈 시편의 균열성장 및 파괴양상은 SFRC1-시리즈와 거의 동일하다.



(a) RC 1



(b) SFRC 1-1

그림.8 Crack growth and failure mode for test beams

4. 강섬유 보강 단순보 및 연속보의 해석

본 연구에서는 강섬유 보강효과를 고려하여 비선형 해석을 시행하는데 있어 연성재료에 비교적 적합한 Von-Mises의 항복 이론을 적용하여 모델링 하였으며, 각 단면의 초기중립축 산정식은 식(1)을 사용하였다.

$$x = \frac{bh \times \frac{h}{2} + (n_s - 1)A_s \times d + (n_{sh} - 1) \times A_{sh}}{bh + (n_s - 1)A_s \times d + (n_{sh} - 1) \times A_{sh}} \quad (1)$$

여기서, n_s : 철근과 콘크리트의 탄성계수비, n_{sh} : 강섬유와 콘크리트의 탄성계수비

4.1 Von-Mises의 항복이론

단위체적당 뒤틀림의 전단변형률 에너지가 고정 값에 도달했을 때 파손한다는 이론으로 수학적으로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2k_2^2 \quad (2)$$

2차원 평면문제에서는 $\sigma_3 = 0$ 이므로 식(2)는 식(3)과 같으며

$$\sigma_2^2 + \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 = \frac{1}{2} k_2^2 \quad (3)$$

1차원 Truss에서는 식(4)와 같다.

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{2} k_2} \quad (4)$$

이상의 항복조건을 적용하고 구조물의 대칭성을 고려하여 시험체의 좌측부만 취하여 1cm 간격으로 콘크리트는 4각형 4절점 및 4각형 8절점의 비선형재료로, 철근은 2절점 truss로 모델링하였다.

비현형 해석시 하중단계는 5등분으로 하였으며 반복횟수는 3회로 하였고, 허용오차는 1%로 제한하여 비선형해석을 수행하였다.

참고문헌

1. ACI Committee 544, "Design Constructions for Steel Fiber Reinforced Concrete," ACI Structural Journal, Vol.35, No.5, Sep. 1998, pp. 536-580.
2. ASTM committee "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete" C 1116-91 pp.578-582
3. Holmen, J.O., "Fatigue of Concrete by Constant and Amplitude Loading", Fatigue of Concrete, SP-41,ACI, 1982, 401pp.
4. 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, pp369~384
5. Williamson, G.R., "Effect of steel fibers on the compressive strength of concrete," Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, 1974, pp.195-208.
6. 광계환, "강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트보의 거동 및 보수에 관한 연구", 1998년 건설교통부.
7. "시멘트·콘크리트의 품질시험 및 품질관리", 사단법인 한국콘크리트 학회, 2000년 제 1회 기술강좌, pp 58~68
8. 장동일, "강섬유 보강 콘크리트의 휨거동에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 제 2권 2호, 1990.11, pp169~174
9. 「한국건축구조 기술사회」 제1차 기술세미나 자료집 "강섬유 보강 콘크리트의 설계 및 적용" 1998, pp1-12