

강섬유보강콘크리트의 휨거동에 관한 연구

A Study on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Structures.

張東一*, ^o蔡元奎**, 李命九***
Dong-Il, Chang · Won-Kyu, Chai · Myeong-Gu, Lee

ABSTRACT

Fracture tests were carried out in order to investigate the flexural behavior of SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) structures. Sixty three SFRC beams were used in the tests, the fracture mode, the relationships between loading and strains, and the relationships between loading and mid-span deflections of the beams were observed under the three point bending loading.

From the test results, the effects of steel fiber contents and a/h ratio on the concrete flexural behavior were studied, and the stress intensity factors and the flexural strength of SFRC beams were calculated. According to the results of regression analysis, predicting formulas for the flexural strength of SFRC beams are also suggested.

1. 서론

1-1. 연구배경 및 연구목적

강섬유보강콘크리트의 실용화에 대한 연구는 1963년 Romualdi와 Batson¹⁾에 의해 최초로 연구되었다. Romualdi와 Batson은 균열구속체로 연속섬유를 치밀한 간격으로 배치한 공시체를 이용하여 휨시험을 행하여 Griffith의 선형파괴역학에 기초를 둔 모델을 사용 콘크리트 초기균열강도가 섬유간격에 의해서 지배됨을 확인하였다. 또한 Romualdi와 Mandel²⁾은 1964년 짧은 강섬유를 균등하게 분산한 콘크리트에 대하여 실험을 행하고 강섬유보강콘크리트의 균열강도가 섬유간격에 의해서 지배됨을 보였다. Shah와 Rangan³⁾은 1971년 강섬유로 보강된 콘크리트는 인성과 에너지흡수성 및 피로특성이 개선된다고 하였으며, Chen과 Carson⁴⁾은 1971년 섬유길이와 섬유보강콘크리트의 인장강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 1972년 Batson⁵⁾ 등은 강섬유를 철근과 함께 사용하여 비틀림 및 전단 보강재로서의 사용 가능성을 제시 하였고, 1985년 Niyogi와 Dwarakanathan⁶⁾은 모멘트와 전단력하에서의 강섬유보강콘크리트의 거동에 대하여 연구하였다.

이들 연구에 의하면, 강섬유보강콘크리트의 강도증대 효과는 강섬유혼입량, 강섬유형상비, 강섬유의 배향 등에 따라 달라지고 있음을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 강섬유보강콘크리트

의 강도증대 요인인 강섬유혼입량을 0.0% ~ 1.5%로, 강섬유형상비를 60 ~ 100으로 하여 시험체를 종류별로 분류 하였으며, 각 종류마다 초기균열비(a/h)를 0.2 ~ 0.4로 하여 3점휨하중실험을 행하였다. 파괴시험시 각 시험체의 하중변화에 대한 파괴양상, 휨 변형률, 중앙처짐 등을 조사하였고, 이들 결과를 토대로 강섬유혼입량과 강섬유형상비가 강섬유보강콘크리트의 휨거동에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 본 연구에서는 강섬유혼입량과 강섬유형상비에 따른 강섬유보강콘크리트의 응력확대계수 및 휨강도를 비교하여 보았으며, 이들 결과를 회귀분석하여 강섬유보강콘크리트의 휨강도를 예측할 수 있는 예측공식을 제안하였다.

2. 실험

2-1. 사용재료 및 시험체의 종류

본 실험에서는 강섬유보강콘크리트 시험체 제작시, 굵은 골재의 최대 치수가 19mm인 강자갈, 강모래를 사용하였고, 우리나라의 콘크리트 시방서⁷⁾의 배합설계 기준에 준하여 표 1과 같이 설계기준강도 350 kg/cm²으로 배합하였다. 배합시 강섬유는 시험체의 전체 체적에 대한 비율로 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%씩 첨가 하였으며, 섬유의 뭉침을 방지하기 위하여 강제식 믹서를 사용하였다. 이때 강섬유는 직경이 0.9mm이며, 길이가 54mm, 72mm, 90mm인 즉, 강섬유형상비가 60, 80, 100인 강섬유를 각각 사용하였다. 사용 강섬유의 재료적 성질은 표 2와 같다.

모 시험체는 10 × 10 × 60cm로 일정하게 모

* 정회원 한양대학교 토목공학과 교수

** 정회원 한양대학교 토목공학과 박사 과정

*** 정회원 한양대학교 토목공학과 석사 과정

두 63개를 제작하였으며, 시험체 종류는 크게 강섬유혼입량이 0.0%, 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%인 5가지, 또 강섬유형상비가 60, 80, 100인 3가지로 구분하였고, 각 종류마다 초기균열비를 0.0, 0.2, 0.4로 시험체를 세분화하였다. 보 시험체에 대한 상세한 특성은 표 3과 같다.

2-2. 실험방법 및 측정

본 연구에서는 하중의 변화에 따른 강섬유보강콘크리트 보 시험체의 횡변형률과 중앙처짐의 변화 및 파괴하중을 측정하기 위하여 파괴실험을 실시하였다. 파괴실험시 하중재하방법은 3점휨하중법으로 하였으며, 100 ton용량의 만능시험기를 사용하여 보 시험체가 파괴 할때까지 하중을 0.1mm/min 속도로 일정하게 재하하였다.

하중이 10kg씩 증가할때마다 보 시험체의 중앙하단에 설치한 콘크리트 스트레인 게이지와 처짐측정기에 의해 횡변형률과 중앙처짐량을 측정하였으며, 보 시험체의 초기균열 발생시의 하중과 최대하중도 아울러 조사하였다. 이때 확대경을 이용하여 균열 성장 양상을 관찰하였다. 파괴실험의 개략도는 그림1과 같다.

3. 결과분석 및 고찰

3-1. 슬럼프 값 및 공시체의 압축강도

강섬유혼입량과 강섬유형상비가 콘크리트의 반죽질기에 미치는 영향을 조사하기 위하여 KS F 2402 규정에 준하여 슬럼프 시험을 행하였다. 이 시험 결과 강섬유혼입량이 증가함에 따라 슬럼프 값은 감소하였으며, 같은 강섬유혼입량 중에서도 강섬유형상비가 커짐에 따라 슬럼프 값이 감소함을 알 수 있었다. 슬럼프 시험의 결과는 표 4와 같다.

한편 본 시험에서는 콘크리트 압축강도 시험용으로 ϕ 10cm x 20cm의 원통형 공시체를 강섬유혼입량과 강섬유형상비에 따라 제작하여 28일 강도를 측정하였으며, 측정결과는 표 5와 같다. 실험에서 측정된 강섬유보강콘크리트의 평균 압축강도는 강섬유혼입량과 강섬유형상비에 대해 특별한 상관 관계가 없음을 알 수 있었다.

3-2. 파괴실험

강섬유혼입량, 강섬유형상비 및 초기균열비의 변화에 따른 강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시의 하중과 파괴하중을 그림 2와 그림3에 각각 비교하여 나타내었다. 강섬유보강콘크리트의 파괴하중은 강섬유가 혼입되지 않은 시험체

에 비하여 강섬유혼입량이 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%인 시험체에서 평균 1.069배, 1.309배, 1.349배, 1.582배의 각각 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다. 즉, 강섬유혼입량이 시험체의 파괴하중에 미치는 효과는 강섬유혼입량이 0.5% 이하일때는 거의 없었으며, 0.5%~1.0%일때는 강섬유가 혼입되지 않은 시험체에 비하여 약 1.3배의 큰 파괴하중을, 1.5% 이상일때는 약 1.5배 이상의 매우 큰 파괴하중을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 강섬유혼입량의 증가에 따른 파괴하중의 증가는 강섬유형상비에도 영향을 받았으며, 세부적으로 강섬유형상비가 60일때는 평균 1.018배, 1.098배, 1.178배, 1.384배로, 강섬유형상비가 80일때는 평균 1.058배, 1.251배, 1.353배, 1.501배로, 강섬유형상비가 100일때는 평균 1.132배, 1.367배, 1.516배, 1.861배로 각각 증가하여, 강섬유혼입량이 같은 시험체일지라도 강섬유형상비가 클수록 파괴하중이 뚜렷하게 증가함을 알 수 있었다. 또한 초기균열이 없는 시험체의 파괴하중에 비하여 초기균열비가 0.2인 시험체의 파괴하중은 평균 0.750배, 초기균열비가 0.4인 시험체의 파괴하중은 평균 0.592배로 각각 감소함을 알 수 있었다.

한편 본 연구에서는 강섬유혼입량, 강섬유형상비가 강섬유보강콘크리트의 균열성장에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 실험결과를 여러 연구자들에 의해 제안된 응력강도계수 계산식에 적용하여 강섬유혼입량과 강섬유형상비의 변화에 따른 응력강도 계수를 계산, 비교하여 보았다.

ASTM E399-74⁸⁾에 의하면, 3점휨실험의 경우 응력강도계수는 다음과 같다.

$$K_I = \frac{PL}{tb^{3/2}} f(a/b)$$

$$f(a/b) = 2.9(a/b)^{1/2} - 4.6(a/b)^{3/2} + 21.8(a/b)^{5/2} - 37.6(a/b)^{7/2} + 38.7(a/b)^{9/2}$$

여기서, P는 작용하중, L은 보의 길이, t는 보의 폭, b는 보의 높이, a는 초기균열길이이다.

BS 5447⁹⁾에 의한 응력강도계수식은 다음과 같다.

$$K_{II} = \frac{3Pl}{Bd^{3/2}} \left\{ 1.93(a/d)^{1/2} - 3.07(a/d)^{3/2} + 14.53(a/d)^{5/2} - 25.11(a/d)^{7/2} + 25.80(a/d)^{9/2} \right\}$$

여기서, P는 작용하중, l은 지점에서 하중까지의 거리, B는 보의 폭, d는 보의 높이, a는 초기균열길이이다.

Bazant, Z.P.¹⁰⁾는 다음과 같은 응력강도계수식을 제안하였다.

$$K_I = \sqrt{\pi a} (PL)/bd^2 f_3(\alpha)$$

$$f_3(\alpha) = 1.635 - 2.603\alpha + 12.30\alpha^2 - 21.27\alpha^3 + 21.86\alpha^4$$

여기서, P는 작용하중, L은 보의 길이, b는 보의 폭, d는 보의 높이, a는 초기균열길이, $\alpha = a/d$ 이다.

이들 제안식들에서 구한 결과는 그림 4에 정리되어 있으며, 강섬유가 혼입되지 않은 시험체의 응력강도계수에 비하여 강섬유혼입량이 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%인 시험체의 응력강도계수는, 초기균열비가 0.2일때 평균 1.076배, 1.116배, 1.162배, 1.455배, 그리고 초기균열비가 0.4일때는 평균 1.253배, 1.528배, 1.603배, 1.885배 씩 각각 증가하였다. 이들 결과에서 강섬유혼입량이 0.5% 이하 일때는 강섬유가 콘크리트 매트릭스의 변형을 구속하는 효과가 적었고, 강섬유혼입량이 0.5% 이상일때는 강섬유혼입량이 증가함에 따라 강섬유가 콘크리트 매트릭스의 변형을 구속하는 효과가 크게 증가함을 알 수 있었다. 이러한 강섬유의 균열성장억제 효과는 초기균열비가 큰 시험체일수록, 또 강섬유형상비가 클수록 뚜렷하게 나타났다.

또한 본 연구에서는 강섬유혼입량, 강섬유형상비의 변화에 대한 강섬유보강콘크리트의 균열성장 억제능력의 변화를 알아보기 위하여 휨강도를 계산하였으며, 각 시험체의 휨강도를 그림5, 그림6, 그림7에 초기균열 종류에 따라 각각 비교 정리하였다.

본 연구에서는 이들 결과를 회귀분석하여 강섬유혼입량과 강섬유형상비의 변화에 따른 강섬유보강콘크리트의 휨강도를 다음과 같은 식으로 유도하였다.

i) 초기균열비가 0인 경우

$$\frac{\sigma_{cf}}{V_f \times (L/D)} = -1.7130 + \frac{0.7747 \times \sigma_m \times (1.0 - V_f)}{V_f \times (L/D)}$$

$$\text{즉, } \sigma_{cf} = -1.7130 \times V_f \times (L/D) + 0.7747 \times \sigma_m \times (1.0 - V_f)$$

ii) 초기균열비가 0.2인 경우

$$\frac{\sigma_{cf}}{V_f \times (L/D)} = -1.3646 + \frac{1.1600 \times \sigma_m \times (1.0 - V_f)}{V_f \times (L/D)}$$

$$\text{즉, } \sigma_{cf} = -1.3646 \times V_f \times (L/D) + 1.1600 \times \sigma_m \times (1.0 - V_f)$$

iii) 초기균열비가 0.4인 경우

$$\frac{\sigma_{cf}}{V_f \times (L/D)} = -1.1119 + \frac{1.8456 \times \sigma_m \times (1.0 - V_f)}{V_f \times (L/D)}$$

$$\text{즉, } \sigma_{cf} = -1.1119 \times V_f \times (L/D) + 1.8456 \times \sigma_m \times (1.0 - V_f)$$

여기서, σ_{cf} 는 강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시 휨강도, σ_m 은 강섬유가 혼입되지 않은 콘크리트의 초기균열 발생시 휨강도, V_f 는 강섬유혼입량, L/D 는 강섬유형상비이다.

4. 결론

본 논문에서 연구한 강섬유보강콘크리트의 휨거동은 다음과 같다.

1) 강섬유보강콘크리트의 균열양상은 강섬유 혼입량이 증가함에 따라, 또 강섬유형상비가 커짐에 따라 불규칙하게 진전되었다.

2) 강섬유보강콘크리트의 압축강도는 강섬유 혼입량, 강섬유형상비에 따라 특별한 변화가 없었다.

3) 강섬유혼입량이 강섬유보강콘크리트의 파괴하중에 미치는 영향은 강섬유혼입량이 0.5% 이하일 때는 거의 없었으며, 강섬유혼입량이 0.5%~1.0% 일때는 강섬유가 혼입되지 않은 시험체에 비하여 약 1.3배, 강섬유혼입량이 1.5% 이상 일때는 약 1.5배의 큰 파괴하중을 나타내었다.

4) 강섬유보강콘크리트의 응력강도계수는 강섬유가 혼입되지 않은 시험체에 비하여 강섬유 혼입량이 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%인 시험체에 서평균 1.165배, 1.322배, 1.383, 1.670배 각각 증가 하였으며, 초기균열비가 0.2일때 평균 1.076배, 1.116배, 1.162배, 1.455배, 그리고 초기균열비가 0.4일때는 평균 1.253배, 1.528배, 1.603배, 1.885배 씩 각각 증가하였다.

5) 강섬유보강콘크리트의 휨강도를 예측할 수 있는 예측공식을 제안하였다.

참고 문헌

1. Romualdi, J.P., and Batson, G.B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement," Journal of ACI, Proceedings Vol. 60, No.6, 1963, pp.775-790.
2. Romualdi, J.P., and Mandel, J.A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," Journal of ACI, Proceedings Vol.61, NO. 6, 1964, pp.657-671.
3. Shah, S.P., and Rangan, B.V., "Fiber Reinforced Concrete Properties," Journal of ACI, Proceedings Vol. 68, No. 2, 1971, pp.126-135.
4. Chen, W.F. and Carson, J.L., "Stress-strain Properties of Random

Wire Reinforced Concrete," Journal of ACI, Proceedings Vol. 68, No. 12, 1971, pp.933-936.

5. Batson, G.B., Jenkins, E., and Spatney, R., "Steel Fiber as Shear Reinforcement in Beams," Journal of ACI, Proceedings Vol. 69, No. 10, 1972, pp.640-644.
6. Niyogi, S.K., and Dwarakanathan, G.I., "Fiber Reinforced Beams under Moment and Shear," ASCE, Vol. 111, No. 3, 1985, pp.516-527.
7. 건설부, "콘크리트 표준 사양서," 서울, 한국, 1988, pp.421-436.
8. Carpinteri, A., "Application of Fracture Mechanics to Concrete Structures," Journal of the Structural Division, No.108, 1982, pp.833-848.
9. BSI, "Plane Strain Fracture Toughness(K_{1c}) of Metallic Materials," BS5447, London, 1977.
10. Bazant, Z.P. and Cedolin, L., "Approximate Linear Analysis of Concrete Fracture by R-Curves," Journal of Structural Engineering, No.110, 1984, pp.1336-1355.

표 1. 시험결과

굽은 공저의 최대 치수 (cm)	출현공저의 범위 (cm)	공저량의 범위 (%)	물 시멘트 비 W/C (%)	간극재물 S/a (%)
13	10	2.0	38.4	45

단위량(kg/cm ³)			
물 W	시멘트 C	간극재 S	굽은공저
135	482	752	936

표 2. 강섬유의 재료적 성질

형상비 (L/D)	길이(L) (cm)	직경(D) (cm)	밀도 (kg/cm ³)	탄성계수 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)
50, 80, 100	5.4, 7.2, 9.0	0.09	7.85	2,040,000	13,000

표 3. 시험체의 종류

시험체 번호	강섬유형상비 (L/D)	강섬유혼입량 (%)	초기균열비 (a/d)	시험체 갯수
P-0	0	0.0	0.0	4
P-2	0	0.0	0.2	4
P-4	0	0.0	0.4	4
A1-0	60	0.5	0.0	1
A1-2	60	0.5	0.2	1
A1-4	60	0.5	0.4	1

(표 3.의 계속)

시험체 번호	강섬유형상비 (L/D)	강섬유혼입량 (%)	초기균열비 (a/d)	시험체 갯수
A3-0	60	1.0	0.0	1
A3-2	60	1.0	0.2	1
A3-4	60	1.0	0.4	1
A4-0	60	1.5	0.0	1
A4-2	60	1.5	0.2	1
A4-4	60	1.5	0.4	1
B1-0	80	0.5	0.0	2
B1-2	80	0.5	0.2	2
B1-4	80	0.5	0.4	2
B2-0	80	0.75	0.0	2
B2-2	80	0.75	0.2	2
B2-4	80	0.75	0.4	2
B3-0	80	1.0	0.0	2
B3-2	80	1.0	0.2	2
B3-4	80	1.0	0.4	2
B4-0	80	1.5	0.0	1
B4-2	80	1.5	0.2	1
B4-4	80	1.5	0.4	1
C1-0	100	0.5	0.0	2
C1-2	100	0.5	0.2	2
C1-4	100	0.5	0.4	2
C2-0	100	0.75	0.0	2
C2-2	100	0.75	0.2	2
C2-4	100	0.75	0.4	2
C3-0	100	1.0	0.0	2
C3-2	100	1.0	0.2	2
C3-4	100	1.0	0.4	2
C4-0	100	1.5	0.0	1
C4-2	100	1.5	0.2	1
C4-4	100	1.5	0.4	1

표 4. 강섬유보강콘크리트의 슬럼프 값 (cm)

강섬유 형상비(L/D)	60	80	100
강섬유 혼입량(%)			
0	15.8		
0.5	15.5	16.0	12.0
0.75	-	12.0	11.0
1.0	15.0	12.5	5.0
1.5	12.0	8.5	0.5

표 5. 강섬유보강콘크리트의 28일 평균압축강도 (kg/cm²)

강섬유 형상비(L/D)	60	80	100
강섬유 혼입량(%)			
0	375.4		
0.5	397.4	328.7	337.3
0.75	-	381.2	310.7
1.0	325.2	300.4	272.6
1.5	385.9	326.3	296.3

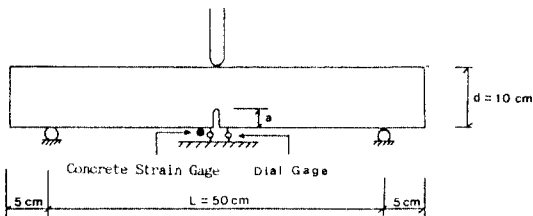


Fig. 1. Three Point Bending Test

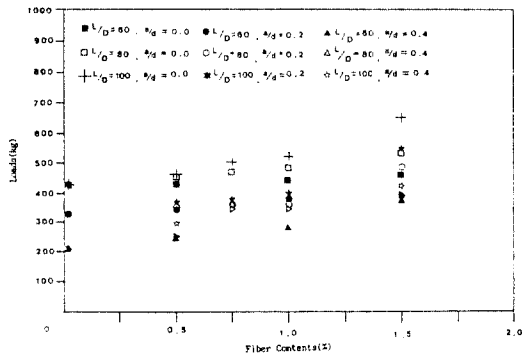


Fig. 2 The Relations between the Initial Crack Loads and Fiber Contents.

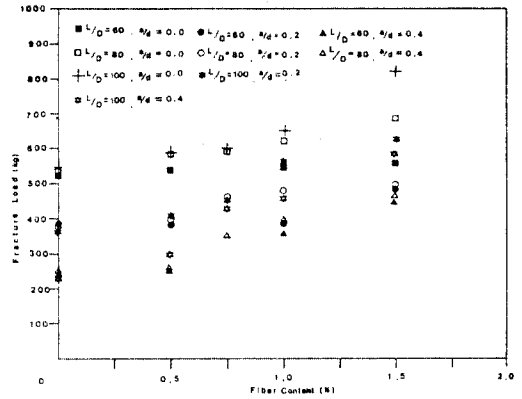


Fig. 3 The Relations between the Fracture Loads and the Fiber Contents

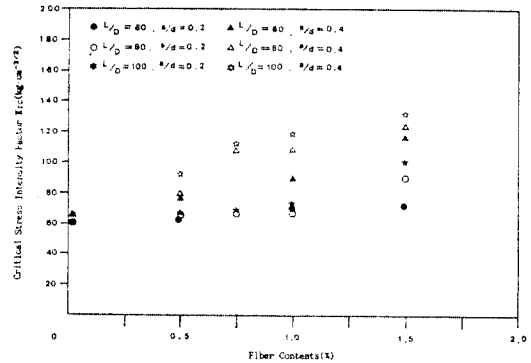


Fig. 4 The Relations between the Fiber Contents and the Critical Stress Intensity Factor

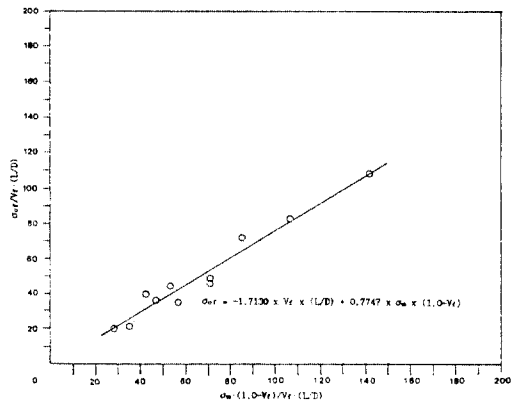


Fig. 5 The Flexural Strength of SFRC. (a/h=0.0)

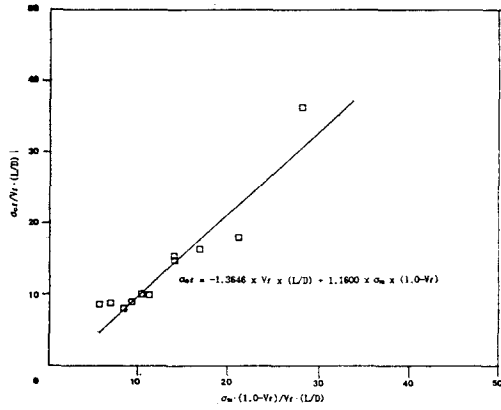


Fig.6 The Flexural Strength of SFRC. (a/h=0.2)

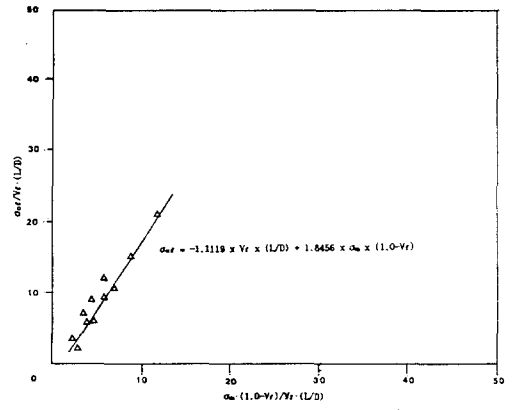


Fig.7 The Flexural Strength of SFRC. (a/h=0.4)