

강섬유보강콘크리트의 균열 이후의 인장거동에 관한 실험적 연구

— 강섬유보강콘크리트의 인장강성 증대효과를 중심으로 —

An Experimental Study on the Post-Cracking Tension Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete

— Focused on Tension Stiffening Effect of Steel Fiber Reinforced Concrete —

서 상 교*

Seo, Sang Kyo

요 약

강섬유를 보강한 철근 콘크리트 프리즘에, 인장하중을 철근에 가하여 강섬유 보강콘크리트가 인장강도에 달한 직후 균열이 발생한 다음에도 강섬유의 연결작용에 의해 철근의 인장강성이 보강되는 현상을 실험적으로 밝혔다.

균열이후에 강섬유보강콘크리트가 발휘하는 철근의 인장강성보강 효과를 인장하중과 평균변형도와의 관계로 나타내고, 그 관계를 근거로 인장강성증가 효과를 평균변형도와 관련시켜 정량적으로 평가하여 강섬유보강 철근콘크리트의 설계에 기초적인 자료를 제공하고 있다.

ABSTRACT

This paper aims at experimentally investigating the relationship between tensile load and average strain in the tension zone of SFRC beam. Also, it is attempted to find post cracking tension behavior of SFRC under tensile loading condition. The tension stiffening test is conducted on the long prism of SFRC which embeds reinforcing bar in both ends of member.

From this study, an empirical equation which represents the tension stiffening effect(i.e.effect of increasing tensile-strengthening contributed by SFRC when the reinforcing bar embedded in the SFRC member is under tensile loading condition) as a function of the average strain is presented.

* 정희원, 충북대학교 공과대학 건축공학과 교수, 공학박사

1. 서론

콘크리트에 강섬유를 혼입한 강섬유보강콘크리트(이하 SFRC라 한다)는 직접인장시험과 휨시험에서 밝혀진 바와 같이 최대응력도에 달한 이후의 변형영역에서도 내력을 유지하면서 큰 인성을 발휘한다는것은 주지의 사실이다. 그러나 순수한 SFRC만을 구조부재에 사용한다는 것은 거의 불가능에 가깝다는것이 이제까지의 여러 연구결과로 밝혀지고 있다.^(1~7) 그러므로 SFRC를 구조적인 부재로써 사용하기 위해서는 철근콘크리트부재에 강섬유를 보강하여 철근과 SFRC의 인장협력에 의하여 얻어지는 상승효과를 유효적절하게 이용하는 것이 바람직하다. 철근콘크리트부재속의 철근이 인장력을 받는 경우, 콘크리트에 다수의 횡단균열이 발생한 이후에도 균열사이 에 있는 콘크리트의 인장협력에 의해서 철근의 강성(剛性)이 겹보기에 증대되는 효과를 가져온다.^(8~13) 이것을 인장강성증대효과(Tension Stiffening Effect, 이하 TS 효과라고 한다)라고 하는데 강섬유의 체적비 2%정도에서는 인장강도의 증가는 거의 기대할 수 없지만, SFRC에 매립되어 있는 철근의 TS효과는 크게 증대될 것이며 특히, 철근항복 이후에도 그 효과가 현저하게 증대될 것으로 예측된다. 그러나 종래의 연구에서는 이와같은 TS효과의 정량적인 평가가 거의 이루어지지 않았다.

본 연구는 모리다시로우(森田司郎)⁽¹⁴⁾가 철근의 인장강성증대 효과를 평가하기 위해 철근콘크리트에 사용한 시험방법을 이용해서, SFRC가 인장균열 이후에도 강섬유의 연결작용에 의해 얻어지는 인장강성증대 효과를 정량적으로 평가할 것을 목적으로 한다.

TS효과를 밝히기 위한 시험에서는 120×120×1500mm 프리즘 시험체의 중앙에 D19 이형철근을 매립하여 프리즘이 축인장응력상태에 있도록 양단으로부터 돌출한 철근에 인장하중을 가하는 인장강성시험(Tension Stiffening Test) 을 한다. 강섬유의 혼입을 및 길이가 TS효과에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 기준 콘크리트의 물시멘트비를 2수준으로 변화시킨 A시리즈, B시리즈에 길이가 다른 강섬유를 체적비 0%, 1%, 2% 혼입한다.

2. 시험계획

2.1 콘크리트의 배합

콘크리트의 배합을 Table 1에 나타낸다. 세골재율(S/A)

=60%, 최대골재크기=10mm의 쇄석, 혼화제 포조리스 No.70을 시멘트 중량 100kg에 250cc를 사용하였다. 물시멘트비(W/C)=50%, 단위시멘트당=454kg/m³를 A시리즈로, 물시멘트비=65%, 단위시멘트당=394kg/m³를 B시리즈로 하였다. 이것을 적용시킨 기준 콘크리트 A시리즈, B시리즈에 이형가공한 강섬유(일본 고오베제강 제품 Sinco Deformed Fiber) 0.5φ×30mm, 0.6φ×50mm의 2종류를 체적비로 0%, 1%, 2%를 혼입하였다.

배합표상의 배합기호의 의미는 다음과 같다. 예를들면

$$\frac{A}{①} \cdot \frac{\bigcirc}{②} \cdot \frac{\bigcirc}{③} \text{에 대해서}$$

- ① 시리즈 A, B를 나타낸다.
- ② 0은 강섬유를 혼입하지 않은 플레인콘크리트, 3은 길이 30mm, 5는 길이 50mm의 강섬유를 나타낸다.
- ③ 0은 플레인콘크리트, 1은 강섬유를 체적비로 1%, 2는 2%혼입한 것을 나타낸다.

콘크리트의 혼합은 강제식 믹서로 하였고 강섬유의 공급은 강섬유공급기를 이용하였다.

2.2 시험체의 제작 및 양생방법

단면 12×12cm, 길이 150cm의 SFRC의 프리즘의 축심에 공칭경 19mm의 이형철근을 매립하였다. 사용한 이형철근의 기계적 성질은 Table 2와 같다. 콘크리트의 타설은 재축과 직각방향으로 하였으며 블리딩의 영향을 없애기 위하여 철근 위치에서 일단 중단했다가 약 20분후 나머지 반을 부어 넣었다. 시험체는 A, B시리즈를 합해서 총 10개의 시험체를 제작하였고 동시에 동일 뱃치로부터 φ10×20cm 실린더 6~12개씩 제작하였다. 다짐은 형틀의 외부를 진동시키는 방법을 적용시켰다. A, B시리즈를 각각 1뱃치로 제작하였고 콘크리트를 부은후 2일간을 실험실의 공기중에 방치한후 탈형하여 수온 20℃±1℃의 양생수조에서 26일간 양생하였다.

2.3 재하방법 및 측정방법

Fig. 1은 철근인장강성시험에 사용한 실험장치를 나타낸다. 120×65×65mm체널로 제작한 반력용 프레임내에 시험체를 넣은후 콘크리트 끝단으로부터 돌출되어 있는 철근에 30톤 알슬러형 유압식 인장시험기로 인장하중을 가하였다. 시험체를 설치하는 도중 및 인장가력하중이 적은 초기 하중단계에서 자중의 영향을 없애기 위하여

Table 1. Mix Proportions of Concretes

Designation	Series	Fiber length (mm)	Volume fraction of fiber (%)	W / C (%)	S / A (%)	Proportion by weight (kg / m ³)				
						Water	Cement	Sand	Gravel	Fiber
A00	A	30	0	50	60	227	454	909	633	0.0
A31			1			225	450	900	626	78.5
A32			2			222	445	891	621	157.0
A51		50	1			225	450	900	626	78.5
A52			2			222	445	891	621	157.0
B00	B	30	0	65	60	227	349	960	667	0.0
B31			1			224	346	950	660	78.5
B32			2			222	342	941	653	157.0
B51		50	1			224	346	950	660	78.5
B52			2			222	342	941	653	157.0

Table 2. Properties of Reinforcing Bar

Steel Grade	Normal diameter (mm)	Normal cross section (cm ²)	Yield point (kg / cm ²)	Stain of yield point (%)	Modulus of elas ticity (×10 ⁴ kg / cm ²)	ϵ_p (%)	E_{sh} (×10 ⁴ kg / cm ²)
SD35 (Nej-Con D19)	19.1	2.865	4007	0.205	1950	1.25	0.0438

* Strain at the commencement of strain hardening

** Approximate value in the range between ϵ_p and 2.7%

평형장치(Fig. 1의 Counter Weighting System 참조)를 시험체의 양단으로부터 30cm 떨어진 2개소에 설치하였다. 매립철근에 가하는 인장하중을 측정하기 위하여 D22이형 철근이 Load Cell의 역할을 할 수 있도록 지름이 다른 2개의 철근을 연결할 수 있는 Coupler Nut(일본 고오베제강 제품)를 주문 제작하여 사용하였다.

평균 변형도를 측정하기 위하여 콘크리트의 양 끝단으로부터 5cm 떨어진 곳에서 앵글을 매립하여 철근에 용접 고정시킨다(Fig. 1의 Details of Instrumentation 참조).

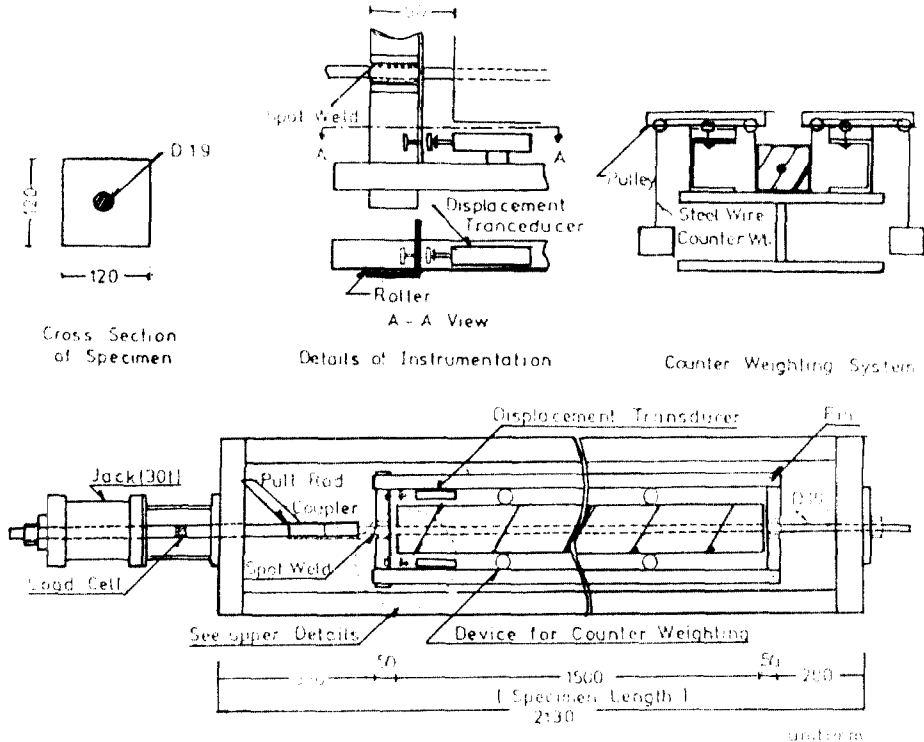


Fig. 1 Test Set-up of Tension Stiffening Effect

그리고 Displacement Transducer(Range = 50mm, Tokyosokki CO.)를 부착한 인장신장량 측정용 봉을 한쪽은 앵글에 핀 상태로 고정시키고, 한쪽은 앵글 위에서 자유로이 이동할 수 있도록 하여 앵글면에 Displacement Transducer의 선단을 접촉시켜 돌출부 철근을 포함한 콘크리트 프리즘의 전 신장량을 측정한다. 따라서 전 신장량은 양 끝단에서 5cm 돌출되어 있는 철근의 신장량까지 포함하고 있으므로 철근의 탄성신장량뿐만 아니라 변형도 경화역 부분의 신장량까지를 수정하여, 콘크리트에 매립된 철근만의 전 신장량을 구해 그 신장량을 부재의 길이 150cm로 나누어 평균변형도(ϵ_{av})를 구한다. 이들 변형량의 측정은 콘크리트 측면의 양측에 설치한 신장량 측정용 봉에 부착시킨 Displacement Transducer의 평균치로부터 구한다.

인장하중의 가력은 초기 균열하중을 정확히 구한 후부터는 적당한 간격으로 하중과 함께 변형량을 기록한다. 상한하중은 변형도경화역에서의 TS효과를 알기 위하여 14톤까지 가한다. 본 시험에서는 특히 콘크리트의 건조수축에 따른 영향을 없애기 위하여 시험체를 양생수로로부터 꺼내 젖은 상태에서 재하하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 콘크리트의 성질

Table 3에 $\phi 10 \times 20$ cm 실린더의 압축시험과 활열시험의 결과를 나타낸다. 압축강도는 강섬유혼입율의 증가에 따른 차는 거의 없었지만, 활열강도는 강섬유혼입율의 증가와 함께 증대되는 경향을 나타내고 있다.

Table 3. Properties of Concretes

Designation of Specimen	Series	Fiber Length (mm)	Volume Fraction of Fiber (%)	Strength by Control Cylinder Test (kg/cm ²)	
				Comp. · F _c	Splitt. tens
A00	A	—	0	423	34.4
A31			1	437	46.4
A32		2	490	69.5	
A51		50	1	420	59.4
A52			2	371	74.4
B00	B	—	0	310	26.7
B31			1	294	43.5
B32		2	353	52.0	
B51		50	1	307	47.3
B52			2	313	67.1

3.2 균열발생후의 TS효과 및 평가방법

1) SFRC의 TS효과

Fig. 1의 시험방법에 따라 실험을 실시하여 얻은 시험체에 대한 하중 P 와 평균변형도 ϵ_{av} 와의 관계를 Fig. 2에 나타낸다. 실험에서 철근에 가해지는 하중이 커지면 콘크리트의 양 끝단에서 철근이 빠져 나오므로 결보기상 초기 균열시의 인장변형도가 Fig. 2안의 인장균열변형도의 수정곡선에서 보는 바와같이 실제보다 큰 값을 갖게된다. 그러므로 본 인장강성시험에서는 강섬유보강콘크리트에 직접인장력을 가하여 초기 인장균열이 발생했을때의 인장변형도의 값, 즉 $\epsilon_{\sigma_0} = 1.5 \times 10^{-4}$ 로 보정한다(ϵ_{σ_0} 의 값은 필자가 실시한 직접인장시험에서 얻은 결과임. 문헌1을 참조바람). 이와같이 보정해서 얻은 SFRC의 인장강도 f_t 값을 Fig. 2안에 나타낸다.

Fig. 2에서 보는 바와같이 플레인콘크리트나 SFRC가 균열발생이후에도 인장하중을 분담하기 때문에 순수한 철근만을 인장한 경우보다도 철근의 강성이 현저하게 증대되는 것을 알 수 있다. 한편 플레인콘크리트에서는 철근이 항복하중을 넘어서면 철근과 콘크리트 사이의 부착효과가 없어서 강성이 저하되어 철근만의 하중-변형도 곡선에 점점 근접하고 있다. 반면에 SFRC에서는 균열 사이에 있는 강섬유의 연결작용에 의해 철근의 탄성범위뿐만 아니라 특히 철근의 항복이후 및 변형도경화역에서 까지도 철근의 인장부담하중이 증대되는 것을 알 수 있다. SFRC의 인장협력에 의하여 얻어지는 철근의 TS 효과는 특히 철근의 항복 이후에도 현저하게 증대되었으

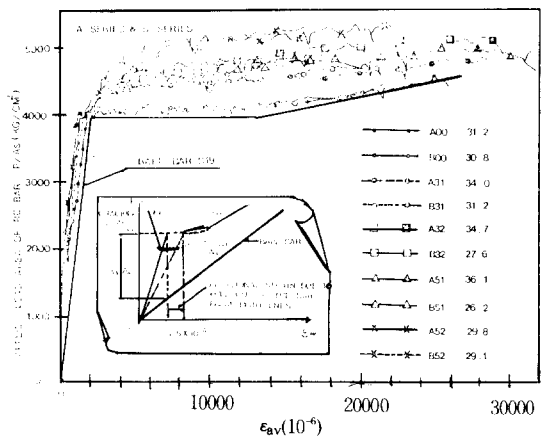


Fig. 2 Load vs. Average Strain Curves

며 강섬유의 혼입율이 증가할수록 기준 콘크리트의 강도가 높을수록 증대되는 경향을 나타내고 있다.

임의의 평균변형도에 대응하는 A32/A51, B32/B51의 TS효과를 비교해 보면 거의 같은 수준을 나타내고 있으므로 긴 섬유를 사용하는 것이 적은 양으로도 큰 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

2) TS효과의 평가법

Fig. 2의 하중-평균변형도곡선의 일반적인 모델을 그려보면 Fig. 3과 같이 된다. TS효과의 설명도에서 알 수 있는 바와같이, 사선을 그은 부분의 곡선과 순수한 철근만의 하중-변형도곡선사이의 종축방향의 차이($P - E_s \cdot \epsilon_{av} \cdot A_s$)를 구해 이것을 SFRC의 순수단면적 A_c 로 나누어 평균인장응력 $\sigma_{c,av}$ 로 표현한다. $\sigma_{c,av}$ 를 각각의 인장강도 f_t 로 나누어 부차원화 시킨 값을 Tension Stiffening Index(TSI로 약한다. TSI는 임의의 평균변형도시, 균열사이에서 있는 SFRC인장응력의 축방향분포의 평균값을 인장강도에 대한 비로 나타낼을 의미한다)로 정의하면 (1)식과 같이 된다.

$$TSI = \frac{\sigma_{c,av}}{f_t} = \frac{P - E_s \cdot \epsilon_{av} \cdot A_s}{f_t \cdot A_c} \quad (1) \text{식}$$

(1)식에 따라 Fig. 2의 각 곡선에 대한 TSI를 구해 평균변형도(ϵ_{av})와의 관계로 나타내 보면 Fig. 4와 Fig.

5에서 실선으로 나타내진다. Fig. 4는 철근의 탄성범위뿐만 아니라 변형도경화영역까지의 A시리즈, B시리즈를 나타내고, Fig. 5는 탄성범위까지만을 확대하여 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 평균변형도 2000 μ 부근에서 산과 산사이의 계곡과 같이 움푹 들어가 SFRC의 TSI가 0에 가까운 값으로 나타나 겉보기에 저하되어 있다. 그 이유는 다음과 같다. 본 시험에서는 SFRC프리즘이 휨재의 인장측에 이미 균열이 양단에서 발생했다고 가정해서, 유한한 단위

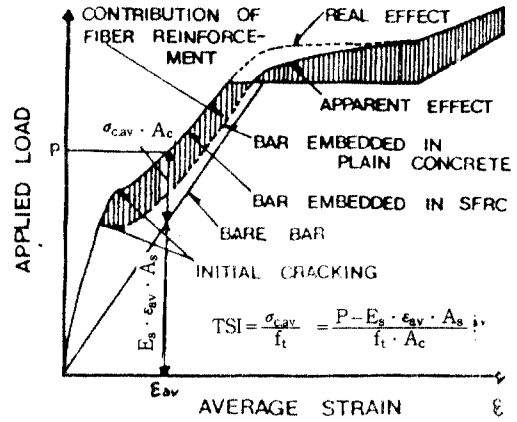


Fig. 3 Explanatory Presentation of TS Effect

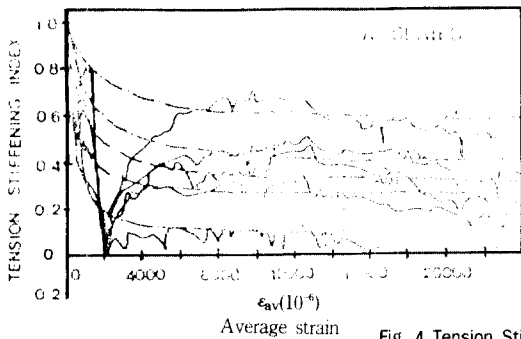


Fig. 4 Tension Stiffening Index(Full Range)

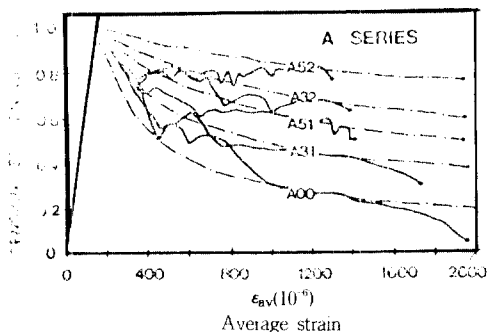
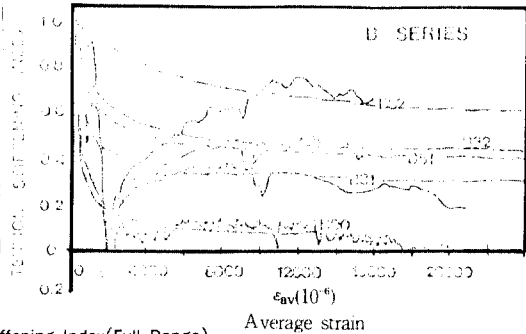
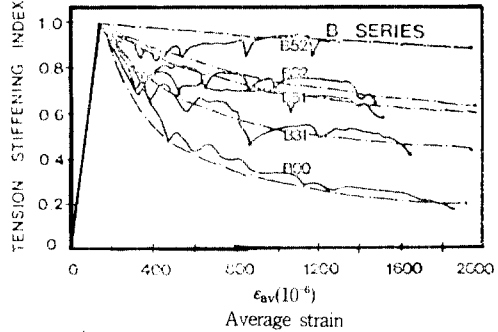


Fig. 5 Tension Stiffening Index(Elastic Range)



길이의 시험체를 양단으로부터 각각 5cm씩 돌출되어 있는 철근에 인장력을 가하는 방법을 택하고 있다. 그러므로 시험체의 끝단부의 밖으로 돌출되어 있는 철근이 항복을 시작하면 하중은 일정상태로 유지되면서 철근신장량만이 급격히 커지다가 변형도경화역에 들어가서야 비로서 하중이 다시 상승하게 되므로 겉보기상 SFRC프리즘의 TS 효과가 저하되었다가 다시 상승하는 것으로 나타나 있다. 이와같은 현상은 철근 자체의 기계적인 성상과 양단에서의 강섬유의 연결이 없다는점, 그리고 이미 균열이 휨부재에서 150cm간격으로 발생했다고 가정 한 시험체 길이의 유한성에 기인된 것으로 생각된다. 확인이 필요하지만 부재길이를 충분히 길게하면 계곡과 같은 현상은 없어지고 철근의 항복점도 겉보기상 더 상승해서 강성이 증대되므로 더욱 높아(Strengthening)질 것으로 예상된다. 따라서 순수철근만이 분담하는 하중을 뺀 SFRC만의 인장분담하중은 철근의 항복하중의 전단계에서 분담하고 있던 하중을 그대로 유지하고 있다가, 돌출부 철근이 변형도경화역에 들어가 철근이 항복 직전에 분담했던 하중값이 다시 나타나는 변형도경화역까지는 Fig. 3에서 점선으로 나타낸 곡선과 같이, 실제상 곡선의 연장상으로 보아야 한다.

Fig. 4의 항복점 부근의 계곡 사이를 무시해서 다음과 같이 (2)식의 형태로 근사곡선을 구해 그려보면 Fig. 4, 5에서 채선과 같이 되며, (2)식의 계수 abc를 Table 4에 나타낸다.

Table 4. Parameters of Empirical Equation

	a	b	c
A00	4000	0.44	0.07
A31	3500	0.77	0.24
A32	1500	1.32	0.36
A51	2000	1.10	0.29
A52	1500	1.98	0.55
B00	4000	0.44	0.06
B31	3500	0.88	0.30
B32	1500	1.43	0.40
B51	2000	1.32	0.39
B52	400	1.98	0.51

$$TSI = \frac{\sigma_c \cdot av}{f_t} = \frac{1}{a_0 \varepsilon_{av+b}} + c \quad (2)$$

4. 결론

1) SFRC의 인장협력에 의하여 얻어지는 철근의 TS

효과는 특히 철근의 항복 이후에도 현저하게 증대되었다.

2) TS효과는 강섬유의 혼입량이 많을수록, 또한 콘크리트의 강도가 높을수록 증대되었으며 강섬유가 길수록 적은 혼입량으로도 큰 효과를 나타냈다.

3) SFRC가 인장균열발생 이후에도 강섬유의 연결작용에 의해 발휘하는 인장인성의 증대효과를 Tension Stiffening Index와 평균변형도와의 관계로 나타내어 정량적으로 평가하였다.

4) 철근의 항복점 부근에서 TS효과의 저하는 겉보기상의 현상으로 예측되지만 확인을 요한다.

5) 시험법상에서 섬유의 길이와 단면의 적정크기에 대한 비율은 앞으로 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 1989년도 한국과학재단 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 한국과학재단에 깊은 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 徐商教, "鋼纖維補強콘크리트에 관한 研究", 大韓建築學會誌, 29卷, 122號, 1985. 2, pp.76-83.
- 小林, 趙, 西村, 安室, "鋼纖維補強콘크리트의 曲げ特性に及ぼす鋼纖維の形狀寸法ならびに粗骨材最大寸法の影響", 第3回콘크리트工學年次講演會論文集, 1981, pp. 185-188.
- 福田, 中丸, 辻井, 五島, "曲げを受けるハリのSFRCによる部分補強効果に關する實驗", 第四回콘크리트工學年次講演會論文集, 1982, pp.141-144.
- 古越, 魚本, 西村, "鋼纖維補強콘크리트を用いた梁の曲げ性狀に關する基礎的研究", 第5回콘크리트工學年次講演會論文集, 1983, pp.465-468.
- 山川, 平川, 小出, "纖維補強콘크리트の破壊靱性に關する一考察", 第1回콘크리트工學年次講演會論文集, 1979, pp.425-428.
- 梅山, 岡村, 小林, "鋼纖維補強콘크리트の曲げ靱性の評價方法", 第2回콘크리트工學年次講演會論文集, 1980, pp.201-204.
- Henager, C.H., "A Toughness Index of Fibre Concrete," Rilem Symposium, 5th to 7th April, 1978, pp. 79-86.

8. 六車, 森田, 富田, “鋼とコンクリート付着に関する基礎的研究”, 日本建築學會論文報告集, 第131號, 1967. 1, pp. 1-8.
9. 森田司郎, 角 徹三, “鐵筋コンクリート部材の引張り試験による付着効果の研究(コンクリートの強度, 乾燥收縮の影響)”, セメント技術年報, No.18, 1964.5, pp.426-430.
10. 後藤幸正, 大塚浩司, “引張異形鐵筋周邊のコンクリートにおける内部ひびわれ”, 第1回コンクリート工學年次講演會論文集, 1979, pp.277-280.
11. 森田司郎, “鐵筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究”, 京都大學博士學位論文, 1965. 4.
12. 小林, 魚本, 趙, “ひびわれ拘束性能の試験方法”, 東京大學生産技術研究所報告, Vol.31, No.1, 1984, pp.27-37.
13. Stavrides, H., “Material Properties and Structural Behaviour of Fibre Reinforced Cement Composites, Chapter 8, The Influence of Fibres on Crack Development and Steel Strain in Uniaxially Tested Specimens,” Thesis Submitted to the University of Sheffield for the degree of Ph.D. June 1978, pp.215-261.