

論文

[2017] 実大 SFRC はりの曲げ挙動に関する研究

正会員 ○町田恭一 (関東学院大学工学部建築学科)  
 正会員 横谷栄次 (関東学院大学工学部)  
 正会員 岡本直 (三井建設技術研究所)  
 松原澄行 (三井建設技術研究所)

1. はじめに

近年、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) は、建築および土木の分野で実用化されつつあり、それに関する多くの実験、研究が活発になされているが、その多くの実験は縮小モデルによるものである。従って、短い鋼繊維が実際の大きな構造物に、どの程度補強効果を発揮するかは、未だ不明な点が多い。そこで実用化に際して構造部材として用いる場合、今までのモデル実験による基礎データをもとに、実大および準実大実験を行い、短繊維による寸法効果を明らかにすることが要求される。

従って、本研究は梁の曲げに関して実大および準実大実験を行い、実大 SFRC はりの曲げ挙動及び鋼繊維の実大ばりに対する補強効果を明らかにすると共に、過去の縮小モデル実験データを用いて、寸法効果を含めた鋼繊維の補強効果係数を得ることにより、簡便な強度推定式の提案を併せて行った。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

試験体は図1に示すように、準実大のはり成 450mm は、はり幅 250mm、長さ 4700mm で上端筋が 2-D13、下端筋 2-D19 (Pt=0.57%)、スターラップ D10-@200 とし、実大のはり成 550mm は、はり幅 300mm、長さ 5800mm、上端筋 2-D16、下端筋 3-D19 (Pt=0.57%)、スターラップ D10-@200 とした。尚、載荷点間の圧縮鉄筋に関しては、鋼繊維の影響を明らかにする意味で配筋を行わなかった。また、せん断補強筋に関しても、純曲げ破壊とする意味から支持点と載荷点の間のみ補強した。試験体名は、はり成が 450mm の場合 SF45、550mm の場合は SF55 とし、その後に鋼繊維混入率 Vf を 0% の場合 00、1.0% が 10、1.5% が 15 と示した。

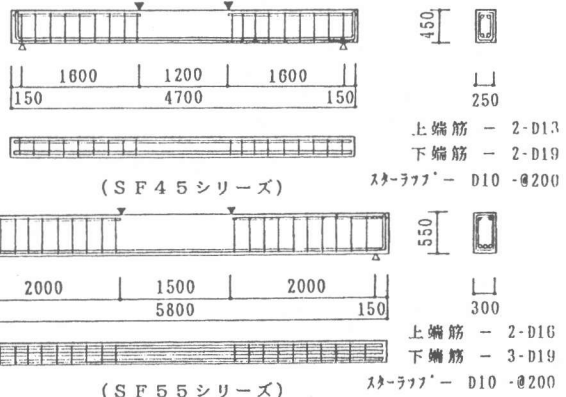


図1. 試験体配筋図

表1. 調査表

試験体種類	鋼繊維混入率 (%)	水セメント比 (%)	細骨材密度 (%)	重量割合 (kg/m³)					
				水	セメント	砂	砂利	鋼繊維	減水剤
SF-00	0.0	54.7	45.8	164	300	843	1007	0.0	3.00
SF-10	1.0	54.7	52.9	181	331	925	822	78.5	3.31
SF-15	1.5	54.7	60.0	198	362	995	663	117.8	3.62

表2. 材料性状

試験体種類	コンクリート			鉄筋			
	圧縮強度 (kg/cm²)	引張強度 (kg/cm²)	ヤング係数 (×10⁻⁵)	鉄筋降伏面 (cm²)	降伏点応力度 (kg/cm²)	引張強度 (kg/cm²)	伸び率 (%)
SF-00	221	24.0	2.11	2.87 D19	3371	5023	14.4
SF-10	232	25.3	1.83				
SF-15	249	30.1	1.80				

使用した材料は、セメントが市販普通ポルトランドセメント、細骨材は最大粒径2.5mmの川砂を、粗骨材は20mm以下を用いて、呼び強度 $F_c=210(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、スランプ値18(cm)を目標とし、試し練りを行い表1の調合により生コンプラントを用いて打設し、そのテストピースによる4週強度を表2に示した。尚、鋼繊維は $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$ のフラット型せん断ファイバーを用いた。

## 2.2 実験および測定方法

実験方法および装置は図2に示すように、支点間距離はSF45シリーズが4400mm、SF55シリーズが5500mmの単純支持とし、荷重スパンはSF45が1200mm、SF55が1500mmの2点集中とし、200tの万能試験機によって加力を行った。

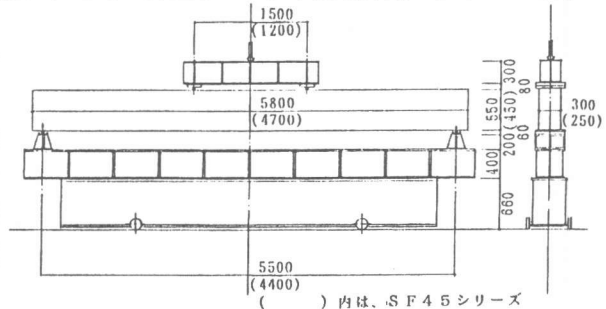


図2. 加力装置

加力方法は初亀裂確認まで0.2tピッチとし、それ以後降伏点まで0.5tピッチの荷重制御とした。降伏後は変位制御とし、中央点たわみがスパンの比 $\delta = \ell / 1000$ となる値、即ちSF45では4.4mm、SF55では5.5mmピッチで $\delta = \ell / 200$ となる中央点たわみ22、27.5mmまで単調増加荷重を行い、その後1tピッチで除荷した。この行程を1サイクルとする。2サイクル目からは、降伏点までを1tピッチとし、以後4.4mmおよび5.5mmピッチで $2\ell / 200$ 、 $3\ell / 200$ 、 $4\ell / 200$ と各サイクルごとに中央点の最大たわみを変化させ、5サイクル目は終局まで加力を行う。除荷は1サイクル目と同様である。

測定方法は、荷重をロードセル、たわみをピストン変位計、ひずみをコンクリートおよび鉄筋ゲージ、曲率に関してはワイヤゲージで測定し、静ひずみ測定機を経てパーソナルコンピュータによって記録した。また、各荷重点における亀裂状況を記録し、亀裂幅をマイクロスケープで測定した。

表3. 実験結果一覧

## 3. 実験結果および考察

表3に初亀裂、降伏および最大荷重とその時の中央点たわみと、図3に荷重-中央点たわみ履歴曲線を示した。これらの結果から、初亀裂荷重に関してSF45シリーズでは、RCの初亀裂荷重に対して $V_f=1.0\%$ で60%、 $V_f=1.5\%$ で42%の鋼繊維による補強効果が現れているが、SF55シリ

試験体名	初亀裂時		降伏時		最大荷重時	
	荷重 (t)	たわみ (mm)	荷重 (t)	たわみ (mm)	荷重 (t)	たわみ (mm)
SF45-00	0.60	0.29	8.75	13.39	10.08	111.00
SF45-10	0.96	0.47	10.30	13.08	10.93	63.97
SF45-15	0.85	0.38	11.00	14.13	11.01	35.35
SF55-00	1.56	0.68	13.01	17.95	14.40	125.19
SF55-10	1.70	0.90	16.05	19.84	16.26	99.10
SF55-15	1.25	0.58	15.60	18.39	16.33	68.83

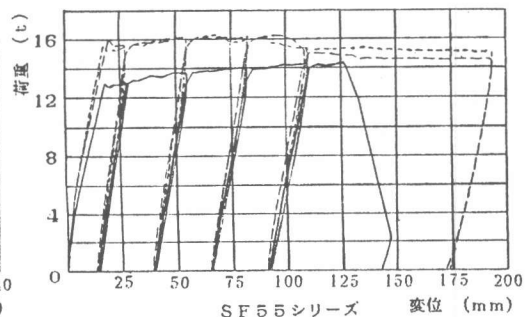
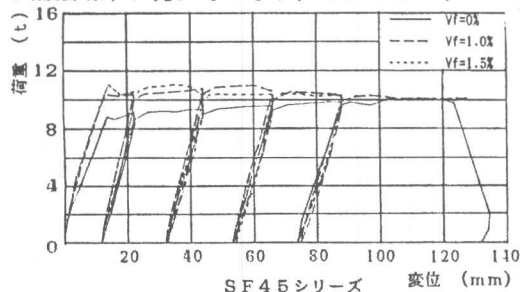


図3. 荷重-たわみ履歴曲線

ーズでは $V_f=1.0\%$ が9%増に対し、 $V_f=1.5\%$ では逆に20%減となっている。これは、初亀裂の発見が目視に依っているため、正確な初亀裂荷重を把握する事は困難であり、特にSF55のRCに関しては、実際の初亀裂がもっと低い事が充分考えられる。一方、降伏時の荷重に関しては、SF45およびSF55シリーズとも、RCに比べ $V_f=1.0, 1.5\%$ 相方20%前後の増加を示し、鋼繊維の補強効果が現れている。また、最大荷重に関しても、降伏時同様RCに対し10%前後の増加となっている。尚、最大荷重に関しては、SF45シリーズに於て鋼繊維混入率が0%(RC)で5サイクル目に、1%では3サイクル、1.5%で2サイクル目に、SF55シリーズでは0%で5サイクル目に、1%では4サイクル、1.5%で3サイクル目に最大強度が生じている。これは、 $V_f$ が0%の場合、たわみが大きくなる事によって、鉄筋のひずみ硬化が生じるためと思われる。一方、 $V_f=1.0, 1.5\%$ に関しては、降伏後鉄筋のひずみ硬化によって徐々に耐力は増すが、ある亀裂幅に達すると鋼繊維の引き抜きが生じ、ひずみ硬化よりその引き抜けによる耐力低下の方が大きくなるため、全体の耐力は低下し、最終的に鋼繊維が完全に引き抜かれた状態になると、RCの最大荷重に近づく。また、鋼繊維量が増す事により、荷重ピーク値が早まるのは、鋼繊維の亀裂拘束によって、繊維量の増加に伴い、ひずみが抑えられるためと思われる。すなわち最大荷重時の圧縮ブロックの大きさは、降伏後でありそれほど大きな違いはないと考え、それに釣り合うための引張ブロックの大きさは、引張剛性に大きく影響され、繊維が増すと引張剛性も大きくなり、ひずみが小さい時点で釣り合う。従って、繊維の増加に伴って、最大荷重のたわみ(ひずみ)は小さくなると思われる。

図4は亀裂性状図であり、この図をみるとSF45、55シリーズともRCに多くの亀裂が存在し、鋼繊維量が増すにつれ亀裂本数が減少している。一般に繊維を混入すると、応力が分散し細かい亀裂が多く生じると言われているが、実際には繊維は均等に分散配向される事はなく、その結果繊維の少ない箇所に亀裂が生じ、応力集中によって亀裂が進展すると同時に、繊維量増加に伴う亀裂拘束効果が繊維の効いている部分で有効に作用するので、亀裂本数が減少するものと思われる。図5は、荷重と亀裂幅を示したものであり、この亀裂幅に関しては、最初に生じた中央部の亀裂に対し、各荷重毎に測定を行ったものである。従って、必ずしも最

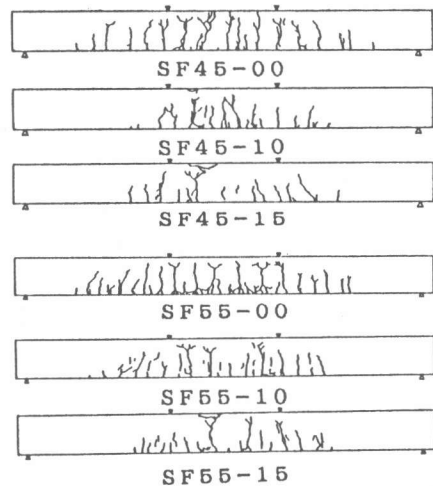


図4. 亀裂性状

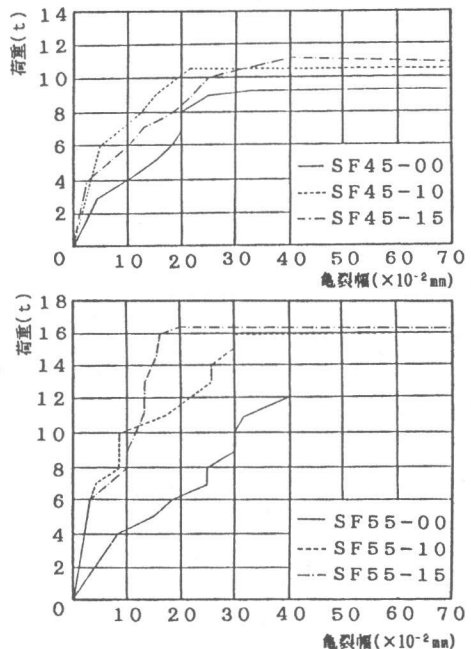


図5. 亀裂幅

も最大亀裂幅とはならないが、繊維混入率別の荷重と亀裂幅の関係の目安にはなると思われる。この結果を見ると、SF45、55シリーズとも同一荷重点におけるRCの亀裂幅がSFRCに比べ大きくなっている。これは鋼繊維による亀裂拘束効果およびSFRCの曲げ剛性の増大による同一荷重点におけるたわみ量の違いによるものと思われる。また、鋼繊維混入率1.0、1.5%に関しては、SF45と55では多少性状が異なっている。SF45では全般的に降伏時までは $V_f=1.0\%$ の亀裂幅が小さく、SF55では逆に $V_f=1.5\%$ が小さくなっている。これは、前にも述べたように、1箇所の亀裂に関して追跡測定しているため、最大亀裂幅とはならず、現実には他の部分で大きな亀裂が生じている可能性もある。従って、一概にこれによって鋼繊維の亀裂拘束効果を論じる事は出来ないが、前述した亀裂性状から見て、 $V_f=1.5\%$ の亀裂本数が少ない事から、少なくとも最大亀裂幅は $V_f=1.5\%$ の方が大きいのではないかと考えられる。

図6は、モーメントと曲率を示したものであり、曲率に関しては載荷点間の圧縮および引張縁から5cmのはり側面にワイヤージを取り付け、そのひずみによって求めた。この

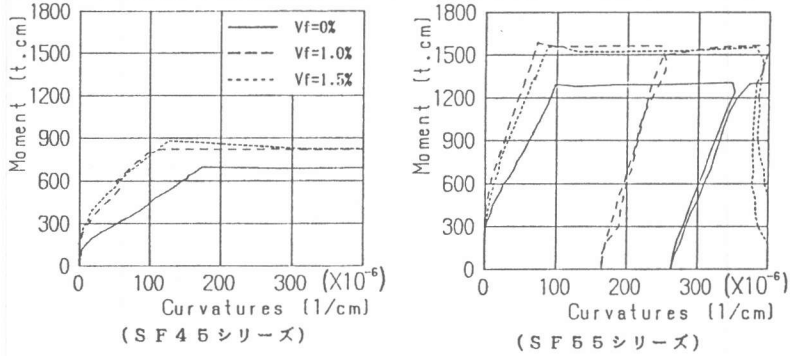


図6. モーメントー曲率

結果から初期剛性および降伏点での剛性を求めたものを表4に示す。初期剛性はSF45シリーズに関してRCおよびSFRCともほぼ同様であるが、SF55シリーズでは繊維混入率1%、1.5%RCの順に大きくなっている。また降伏時の剛性は、SF45ではRCに比べて $V_f=1.0、1.5\%$ とも1.7倍強の剛性を有しており、SF55では $V_f=1.0\%$ で1.6倍、 $V_f=1.5\%$ で1.3倍弱の剛性を示している。一般に初期剛性は同一断面に於て繊維量に関係なくほぼ一様で、初亀裂発生後繊維によって剛性の低下が抑えられると考えられている。SF45シリーズに関しては、これと同様の傾向を示している。SF55シリーズでは初期剛性にバラツキがあり、しかもRCが最も大きな値を示しているが、これは先にも述べたが初亀裂を目視に頼っている事による初亀裂荷重の誤差によるものと思われる。尚、参考までに初期剛性を各断面の断面2次モーメントとヤング係数の積で求めると、SF45は $3.42 \times 10^{10}$ でSF55が $7.49 \times 10^{10}$ となる。ここでヤング係数は、RCの圧縮試験によるヤング係数の1割減の $E=1.8 \times 10^5$  (kg/cm<sup>2</sup>)を用いた。この事からも、SF45に関しての初期剛性はかなり良く一致しており、またSF55に関しては、SFRCの初期剛性が多少低く評価されたものと思われる。剛性低下率で比較すると、SF45シリーズではRCが12%、 $V_f=1.0\%$ で22%、 $V_f=1.5\%$ が22%で、SF55シリーズはRCが16%、 $V_f=1.0\%$ で33%、 $V_f=1.5\%$ が23%であった。従って、この事からも、亀裂後のSFRCは繊維によって剛性が向上する事が判る。

表4. 曲げ剛性

試験体名	初期剛性 ( $\times 10^{10}$ )	降伏時剛性 ( $\times 10^9$ )	剛性低下率
SF45-00	3.30	3.98	0.12
SF45-10	3.26	7.10	0.22
SF45-15	3.57	6.90	0.19
SF55-00	7.47	12.1	0.16
SF55-10	5.88	19.5	0.33
SF55-15	6.71	15.2	0.23

鋼繊維による靱性の評価をするために、履歴吸収エネルギーを求めたのが表5である。この結果を見ると、SF45、55シリーズとも降伏点までのSFRC弾性エネルギーは、剛性の増大に伴う耐力の増加によって、RCに対してそれぞれ30%前後大きくなっている。また1サイクル目の吸収エネルギーはRCに対して37~46%、2サイ

表5. 履歴吸収エネルギー

試験体名	弾性時	1サイクル	2サイクル	3サイクル	4サイクル
SF45-00	6.86	9.96	36.21	51.14	72.52
SF45-10	8.74	13.83	39.03	63.11	86.06
SF45-15	9.27	14.55	41.33	64.51	87.69
SF55-00	13.68	21.23	53.89	87.25	122.38
SF55-10	18.92	29.13	67.29	107.42	147.42
SF55-15	17.34	29.74	67.74	107.94	146.44

(t・cm)

クル目は25~37%、3サイクル目が約25%、4サイクルが20%大きくなっている。このことから、靱性に関しても、鋼繊維を混入する事によって改善される事が判る。尚、SF45および55シリーズのRCは、5サイクル目にはり中央の圧縮縁コンクリートの圧壊によって、急激に耐力が低下し破壊に至ったが、SFRCはそれ以降、除々に耐力は低下したが破壊に至っていない。これは、RC同様圧縮縁コンクリートの圧壊は生じているが、鋼繊維によって圧縮コンクリートも改善され、急激な圧壊の進行を防いだためと思われる。

#### 4. SFRCばりの曲げ終局強度の略算推定式

SFRCばりの曲げ終局強度に対して、簡便でしかも精度のある推定式が以前から望まれていた。そこで本報の実大実験結果を用いて、寸法効果を含んだ鋼繊維補強効果係数を得ることによって、RCと繊維補強コンクリートの曲げ強度累加式であるSFRC部材の曲げ終局強度略算式<sup>[1]</sup>の提案を行なう。

$$M_u = 0.9at \cdot \sigma_y \cdot d + k_f \cdot \sigma_t \cdot b \cdot D^2 \quad (1)$$

この累加式の鋼繊維の項に於て、はりの有効成dではなく全成Dを用いる。これは鋼繊維が引張側全断面で効くと考えたことと、k<sub>f</sub>をかぶりも考慮する事により簡便化が可能となる。ここで、鋼繊維補強効果係数とは、(1)式の鋼繊維の項におけるk<sub>f</sub>である。

$$k_f = \frac{M_u - 0.9at \cdot \sigma_y \cdot d}{\sigma_t \cdot b \cdot D^2} \quad (2)$$

となる。ここでσ<sub>t</sub>はMuhidinによる寸法効果を考慮した引張強度式<sup>(6)</sup>とし次式で与える。

$$\sigma_t = 0.4V_f \frac{\varnothing f}{df} \left(1 + 0.57 \frac{\varnothing f}{b}\right) \sqrt{F_c} \quad (3)$$

ここで、df、 $\varnothing f$ 、V<sub>f</sub>は、それぞれ鋼繊維の直径、長さ、混入率、bははり幅、F<sub>c</sub>はコンクリート圧縮強度を示す。従って、(3)式を用いて(2)式から得られる鋼繊維補強効果係数は、寸法効果が含まれたものである。尚、k<sub>f</sub>を求めるに当たっては、M<sub>u</sub>にSFRCの実験による最大曲げモーメントを、また0.9at・σ<sub>y</sub>・dは略算式であるため、実験による同タイプのRCの最大曲げモーメントを用いた。これらの実験値に関しては、本実験および過去に本研究室で行ったものと、同様な実験を行っている文献から引用した。その結果を用いて、k<sub>f</sub>とはり成Dの関係をプロットしたのが図7である。この結果を見ると、はり成が25cmのk<sub>f</sub>の平均値がそれ以下およびそれ以上のはり成のk<sub>f</sub>の平均値をかなり上回っており、またはり成30cm以上になるとk<sub>f</sub>は急激に減少する事から、このD=25cmが寸法効果の限界と考えた。従って、D=25cmまでk<sub>f</sub>一定とし、25cm以下のk<sub>f</sub>の全平均値1.08を、また45cm以上も一定とし全平均値の0.43とした。一方、はり成25cmから45cmの間のK<sub>f</sub>の減少傾向を指数関数で表現する事とし、

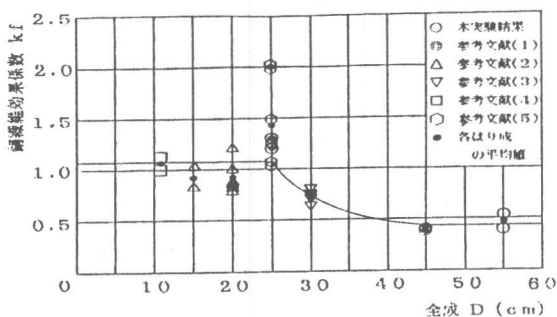


図7. 鋼繊維効果係数-はり成

$kf = e^{((0.0474D - 2.15) - 0.844)}$ を得た。これらのモデル化した結果を図中に実線で示した。曲げ終局

強度略算式に、得られたkfを用いて求めた値と実験値と比較したものが図8である。この結果を見ると実験値が多少大きくなっているが、全般的にかなり良く一致している。これは略算式のRCの項 $0.9at \cdot \sigma_y \cdot d$ が実際のRCの曲げ耐力より多少小さく評価されている為と思われる。

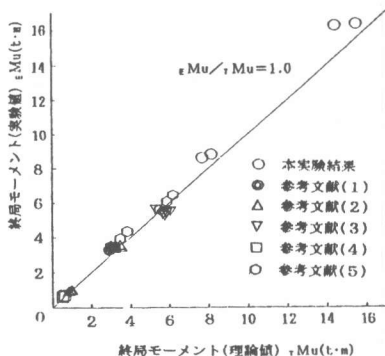


図8. 終局モーメント(実験値/理論値)

### 5. まとめ

実大SFRCばりの曲げ実験を行い、実大構造物に対する鋼繊維の補強効果を明らかにするとともに、寸法効果を考慮した鋼繊維補強効果係数を算出し、それを用いて終局曲げ強度の略算推定式の提案を行った。その結果以下の事が判った。

- (1) 実大および準実大のはりに対して、SFRCはRCに比べ、最大曲げ強度で10%、降伏時曲げ剛性で26~78%、吸収エネルギーで20~30%の増加があり、鋼繊維の補強効果が見られた。
- (2) 靱性に関しては、RCが圧縮コンクリートの圧壊によって急激な耐力低下をしたのに対し、SFRCは、RCの圧壊以降のたわみに対して、鋼繊維による圧縮ブロックの改善により除々に耐力は低下するが破壊に至らなかった。
- (3) 亀裂に関しては、鋼繊維の少ない箇所では亀裂が生じ、他の部分は繊維によって亀裂拘束されるため、繊維量の増加とともに亀裂数は減少した。
- (4) 実大および準実大ばりに対する鋼繊維の補強効果は、縮小モデルに比べ減少する事が鋼繊維補強効果係数より明らかになった。
- (5) 鋼繊維補強効果係数のモデル化により、それを用いて終局曲げ強度の略算推定式を計算すると、実験値と良く一致した。

尚、鋼繊維補強効果係数に関しては、試験体数が充分でなかったため、より多くの実験を行い、精度があり汎用性を有するものにする所存である。

### 参考文献

- [1] 横谷栄次、町田恭一、峰善昭：逆T型SFRC部材の曲げ挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集Vol.10-3,1988.8
- [2] 小林保：鋼繊維補強コンクリートを用いた梁の曲げ及びひび割れ、土木技術資料 19-1, 1977
- [3] C.H Henagr: Ultimate of reinforced steel fibres concrete beams
- [4] 山川純雄、白川潔、三好博嗣：スチールファイバー入り鉄筋コンクリート梁の力学特性
- [5] 関口幹夫、宍戸薫、須山明宏：鋼繊維補強コンクリート梁の曲げ性状、東京都土木技術年報 昭和52年 Annual Report I.C.E.C of TMG 1977
- [6] N.A.Muhidin and P.E.Regan;Chopped steel fibre reinforced materials.Institution of Civil Engineers, London,1977