

# 論文 鋼繊維補強コンクリートの变形特性とモデル化

庄司 宏臣\*<sup>1</sup>・椿 龍哉\*<sup>2</sup>・SUMITRO Sunaryo \*<sup>1</sup>

**要旨:** 鋼繊維補強コンクリートは脆性的な無筋コンクリートとは異なり、ひび割れ後も耐力を保有するように靱性が改善された複合材料である。この性能を適切に評価することは鋼繊維補強コンクリートを用いた構造の变形特性を把握する上で重要である。

本研究では、モルタル中の鋼繊維の補強特性とその補強機構に着目し、ひび割れ後の引張保有耐力、せん断強度、変形曲線を、鋼繊維の体積混入率、モルタル強度をパラメータとして実験的に検討する。また、得られた結果より、鋼繊維の補強機構に関するモデル化を試みる。

**キーワード:** 鋼繊維補強コンクリート、一軸引張、せん断、変形特性、モデル化

## 1. はじめに

コンクリート構造物の高性能化には、コンクリートの高強度化、高靱性化等が必要である。コンクリートの引張特性の改善には鋼繊維による補強が有効であるが、その補強機構には解明されていない点が多い。鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を構造用コンクリートとして用いるためには、その補強機構を明らかにし、変形特性を把握することが必要である [1]。

そこで、本研究では、鋼繊維補強コンクリートの引張特性とせん断特性を実験的に検討する。また、それらの力学特性のモデル化を行う。

## 2. 鋼繊維補強コンクリートの実験

### 2.1 使用材料

使用材料は表-1に示される。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は最大寸法 5mm の川砂である。鋼繊維はインデント加工されたカットワイヤー (ストレートタイプ) である。また、供試体内部を均一な状態にするため粗骨材は使用せず、したがって、鋼繊維投入後の繊維の沈降を防ぐために粘性を確保する必要があり、増粘剤を加えた。

表-1 使用材料

材料	種類 (主成分等)	
水	上水道水(20℃)	
セメント	普通ポルトランドセメント (比重:3.16)	
細骨材	川砂 (比重:2.44,粗粒率:2.45)	
混和剤	AE減水剤	アニオン型特殊高分子活性剤
	増粘剤	水溶性高分子エーテル、高性能減水剤および特性リグニン
鋼繊維	φ0.55(換算径)×25mmカットワイヤー (インデント加工付,引張強度100kgf/cm <sup>2</sup> )	

### 2.2 供試体と配合

#### (1) 一軸引張試験

供試体を図-1に示す。供試体寸法は 10 × 10 × 40cm である。断面中央部に呼び径 φ 22mm の異形 PC 鋼棒を配置し、供試体中央部の相対する 2つの側面に半径 1cm の半円状のノッチを設けた。また、PC 鋼棒の中央 50mm 区間は φ 20mm となるように切削加工を施し、ひずみゲージを

\*1 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻 (正会員)

\*2 横浜国立大学助教授 工学部建設学科、Ph.D. (正会員)

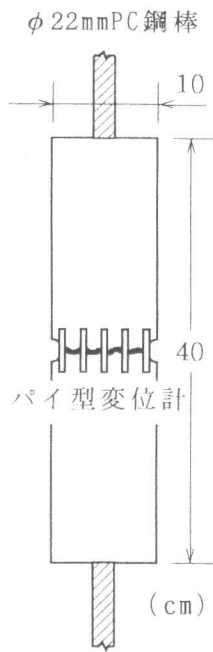


図-1  
一軸引張試験

表-2 供試体と配合

実験	供試体	鋼繊維 混入率 V <sub>f</sub> (%)	鋼繊維の 配置		水セメ ント比 W/C (%)	砂セメ ント比 S/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			本数 (本)	間隔 (mm)			繊維量 SF	水 W	セメント C	砂 S
一軸 引張	N-SF0	0	-	-	50	2.0	0	305	610	1220
	N-SF1	1	-	-	50	2.0	70	305	610	1220
	N-SF2	2	-	-	50	2.0	140	305	610	1220
	H-SF0	0	-	-	30	1.0	0	292	974	974
	H-SF1	1	-	-	30	1.0	70	292	974	974
	H-SF2	2	-	-	30	1.0	140	292	974	974
せん断	N-8	-	128	10	50	2.0	-	305	610	1220
	H-8	-	128	10	30	1.0	-	292	974	974

[注] NシリーズではAE減水剤、Hシリーズでは増粘剤を使用

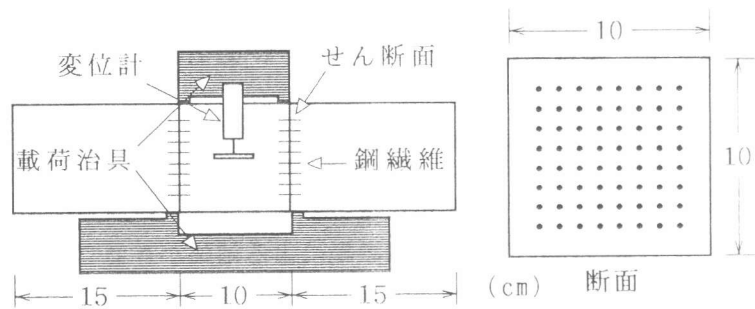


図-2 せん断試験

貼付した。この区間にはグリースを塗り、PC鋼棒とモルタルとの付着が発生しないようにした。モルタル強度と鋼繊維混入率をパラメータとし6種類の供試体を作った(表-2参照)。強度については水セメント比(W/C)が50%のNシリーズ(普通強度)と30%のHシリーズ(高強度)の2種類、そして、鋼繊維混入率(V<sub>f</sub>)については0, 1, 2%の3種類である。練りませにはオムニミキサーを用い、ベースのモルタルを練り上げた後、鋼繊維を投入した。練りませ時間はNシリーズが3.5分(N-SF0のみ1.5分)、Hシリーズが5分(H-SF0のみ4分)である。

供試体は材齢1日で脱型し、20℃の恒温室内で材齢28日まで湿潤養生を行った。

## (2) せん断試験

供試体寸法は一軸引張試験の供試体と同じである(図-2参照)。パラメータはモルタルの強度である(表-2参照)。すなわち、N, Hシリーズの各モルタルを母材とした。鋼繊維は一つのせん断面につき8×8の64本をせん断面に垂直に、せん断面の両側の付着長が等しくなるように配置した。鋼繊維の間隔は縦横ともに1cmである。

鋼繊維をせん断面に配置するために、供試体は中央部打設1日後に両端部を打設し、材齢2日で脱型後、材齢28日まで標準養生(20℃水中)を行った。なお、せん断面には、ビニールシートを2枚はさむことにより、相対するせん断面間の付着を切っている。

## 2.3 試験方法

### (1) 一軸引張試験

一軸引張試験では、アムスラー型万能試験機によりPC鋼棒に引張力を与え、供試体ノッチ部にひび割れを発生させ、ひび割れ部の変形特性を測定した[2,3]。ひび割れ幅は片面5個、計10個のパイ型変位計を等間隔で配置し、ひび割れの各点で計測した。

荷重は、中央部に貫通ひび割れ面を形成したところで除荷し、その後再び荷重を行った。

### (2) せん断試験

せん断試験は、鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法 [4] にしたがって、図-2 に示す試験装置を用い、アムスラー型万能試験機により荷重した。

## 3. 実験結果

### 3.1 材料特性試験

供試体に用いたモルタルおよび鋼繊維補強モルタルの圧縮強度、引張強度、ヤング係数、およびポアソン比の値を表-3 に示す。これらの材料特性の値は材齢 28 日における値であり、3 個の供試体の平均値である。圧縮強度と引張強度は鋼繊維混入率の増加により、値が増加することがわかる。これは、鋼繊維が圧縮における微小ひび割れや割裂引張による連続的なひび割れの進展を抑制する効果によるものと考えられる。

一方、ヤング係数とポアソン比に対する鋼繊維混入率の影響は明確には現れていない。

### 3.2 一軸引張試験

供試体の側面にノッチを設けているため、供試体中央部に発生するひび割れは図-3 に示すように両端部から発生し、貫通ひび割れになると考えられる。図-4 にひび割れ発生付近までの p

表-3 材料特性

供試体	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
N-SF0	328.4	27.5	1.93	0.176
N-SF1	345.3	30.4	1.75	0.203
N-SF2	382.8	33.3	1.80	0.234
H-SF0	624.1	40.6	2.86	0.238
H-SF1	668.9	48.0	2.65	0.230
H-SF2	689.7	50.2	2.79	0.247

[注] 引張強度は割裂試験により測定

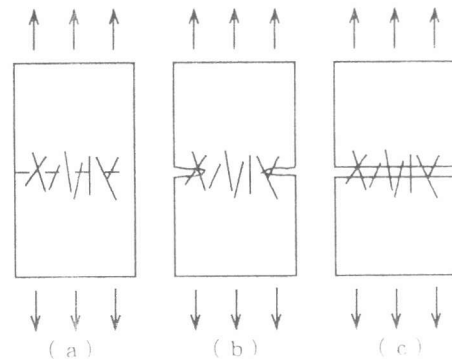


図-3 一軸引張を受ける鋼繊維補強コンクリート

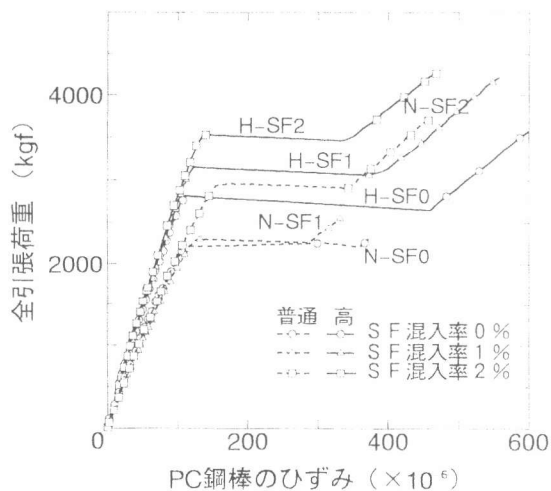


図-4 全引張荷重と PC 鋼棒のひずみの関係

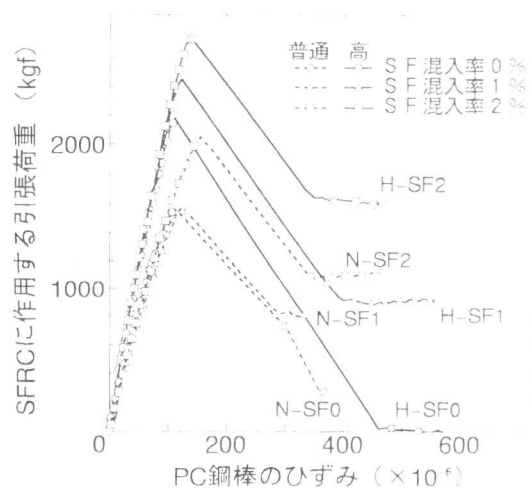


図-5 SFRC に作用する引張荷重と PC 鋼棒のひずみの関係

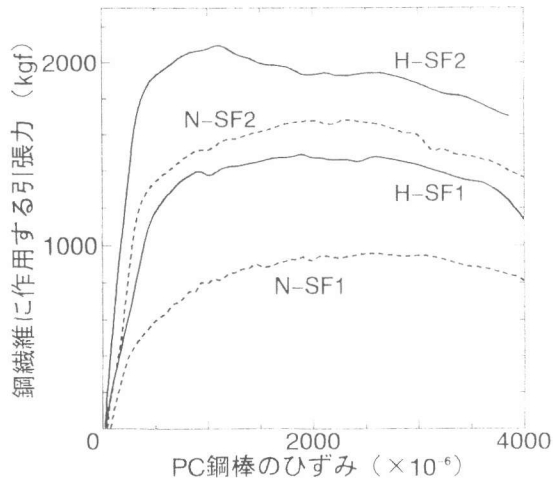


図-6 鋼繊維に作用する引張力と PC 鋼棒のひずみの関係

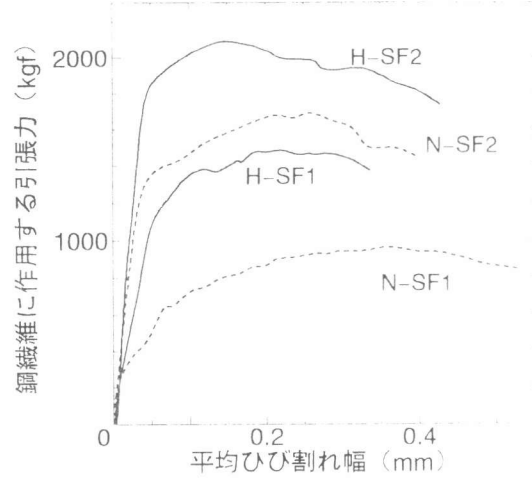


図-7 鋼繊維に作用する引張力と 平均ひび割れ幅の関係

C 鋼棒に作用する引張荷重と供試体中央部の PC 鋼棒のひずみの関係を示す。ひび割れ貫通後は、各供試体とも PC 鋼棒と鋼繊維によってのみ荷重を受け持っていることとみなすことができる。図-5 は全引張荷重から PC 鋼棒の分担力を除いた荷重と供試体中央部の PC 鋼棒のひずみの関係を示す。鋼繊維混入率の大きい供試体ほどひび割れ後の引張保有耐力が大きいことがわかる。

これらの結果から、鋼繊維に作用する引張力と PC 鋼棒のひずみあるいは平均ひび割れ幅との関係を求めた(図-6, 7 参照)。鋼繊維の量が多く、また、強度が大きいほど鋼繊維の分担する引張力が高いことがわかる。そして、鋼繊維とモルタルとの付着破壊の進行により、最大引張力の後、軟化挙動を示すことが確認される。

### 3.3 セン断試験

せん断を受ける鋼繊維補強コンクリートのせん断面の鋼繊維の分布は一般にランダムで、せん断面形成後も鋼繊維の抵抗によりせん断保有耐力を有すると考えられる(図-8(a, b) 参照)。本研究では、せん断面における鋼繊維の変形挙動をより正確に計測するため、図-8(c)のようにせん断面をあらかじめ設け、鋼繊維はせん断面にすべて垂直とした。

図-9 に供試体左右の各せん断面に作用する平均せん断力とせん断変位の関係を示す。平均せ

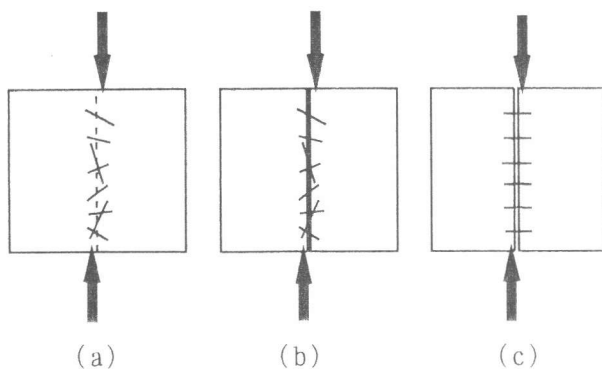


図-8 せん断を受ける鋼繊維補強 コンクリート

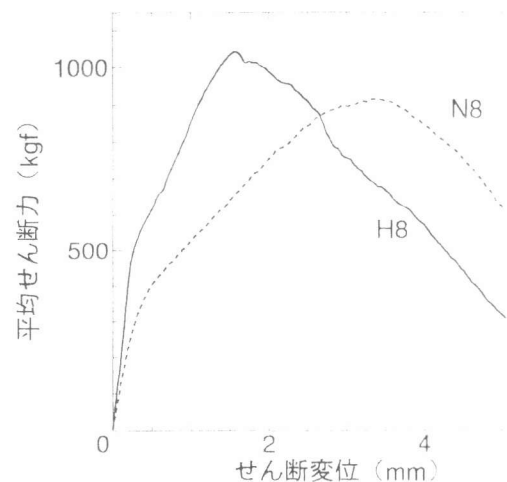


図-9 平均せん断力とせん断変位の関係

せん断力は最大値の後、減少し軟化を示す。せん断面の鋼繊維の状況を観察した結果、高強度の場合は鋼繊維の破断と引抜けがほぼ同数であるのに対し、普通強度の場合はすべて引抜けであることが確認された。また、最大平均せん断力時のせん断変位の値が普通強度の方が大きいことは、付着破壊が早期に始まっていることを意味すると思われる。

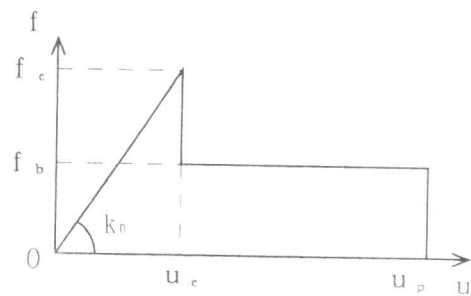
鋼繊維補強コンクリートのせん断に対する変形特性は、これまで十分に明らかにされておらず、鋼繊維の付着長が短いこともあり、一般に無視されている。本研究で用いた供試体では、鋼繊維がせん断に対して最も有効に作用するように、付着長をせん断面に対して両側に等しくとっている。また、せん断面と鋼繊維のなす角度は直角であり、鋼繊維の引抜けが起こりにくいようにしてある。しかし、この結果から、鋼繊維のせん断に対する剛性や強度は無視できない場合があることが確認された。

#### 4. 鋼繊維補強コンクリートの変形挙動のモデル化

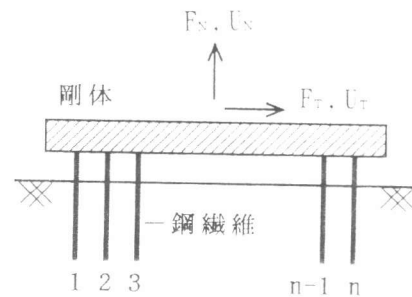
ひび割れ発生後の鋼繊維補強コンクリートの引張特性は、コンクリートの強度、鋼繊維の種類、配向、繊維混入率等、多くの要因により影響される [5]。ここでは、図-10(a) のような付着力と付着変位の関係を仮定し、図-10(b) の並列モデルを用いてシミュレーションを行った。

一軸引張を受ける場合、鋼繊維とコンクリートとの間の付着力と変位の関係がひび割れ発生後の供試体全体の挙動を支配する。付着力と変位の関係は、最大付着力までは線形で、最大付着力到達後、一定の低減された付着力を保持し、ある変位で付着が完全に破壊するようにモデル化した。

せん断を受ける場合は、せん断面付近の鋼繊維下部で母材のコンクリートに局部破壊が生じ、その後、鋼繊維の破断、あるいは引抜けが起こると考えられる。

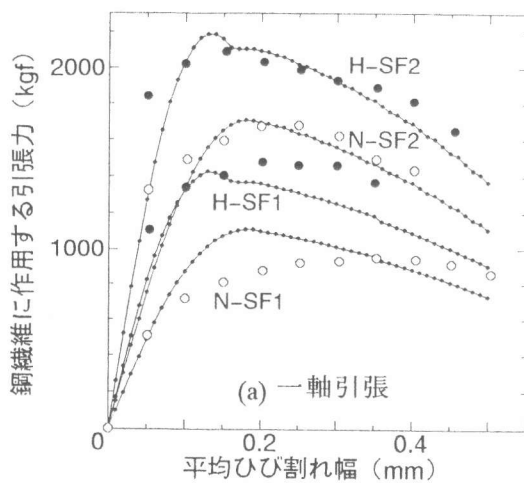


(a) 鋼繊維の力・変位関係

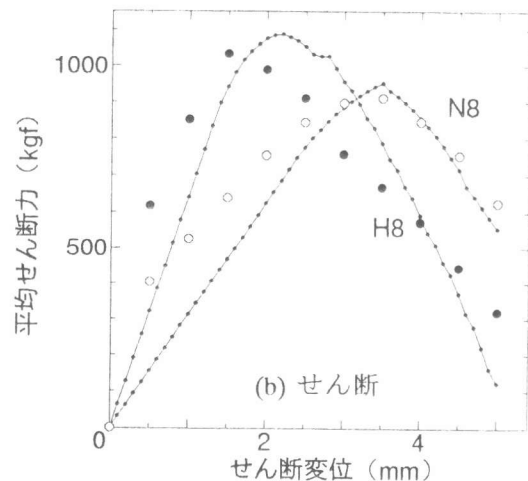


(b) 並列モデル

図-10 鋼繊維のモデル化



(a) 一軸引張



(b) せん断

図-11 鋼繊維補強コンクリートの変形特性のシミュレーション

したがって、せん断面の平均せん断力とせん断変位の関係には、一軸引張で用いた図-10(a)の関係と同様なモデルを用いる。

図-11は鋼繊維補強コンクリートの変形特性の一軸引張とせん断に対するシミュレーション結果を実線で表し、各々の実験結果との比較を示す。

本非線形モデルを用いたシミュレーションで使われた材料定数の平均値は表-4に示す。

一軸引張の場合、ひび割れ面における鋼繊維の有効本数は、混入率が1%の場合65本、2%の場合100本とする。これは、実際の本数はこの数倍と考えられるが、ひび割れ面に垂直方向に有効に作用するものの数として仮定した値である。また、ひび割れ面における鋼繊維の方向は、三次元的にランダムであること、付着長にもばらつきがあることを考慮し、各鋼繊維に対する材料定数には平均値のまわりに片側60%で一様分布のばらつきを仮定した。図-11(a)では、各鋼繊維が受け持つ付着力の和を縦軸に、また、繊維軸方向変位を平均ひび割れ幅として横軸にとっている。実験結果と同様の挙動が得られ、シミュレーション・モデルの妥当性が確認できる。

せん断の場合、せん断面における鋼繊維の本数は、64本とする。これは、供試体に用いた鋼繊維が全てせん断方向に有効に作用すると仮定した値である。付着強度や鋼繊維のせん断面付近の局部破壊の不均一性等を考慮し、各鋼繊維に対する材料定数には片側30%で一様分布のばらつきを仮定した。図-11(b)では、各鋼繊維が受け持つせん断力の和を平均せん断力として縦軸に、また、せん断変位を横軸にとっている。せん断に対する脆性的な挙動がシミュレーションにより得られていることがわかる。

## 5. まとめ

鋼繊維補強コンクリートの一軸引張とせん断に対する変形挙動を実験により検討し、母材となるコンクリートの強度と鋼繊維の混入率の影響を検討した。

また、各々の変形挙動をモデル化し、シミュレーションによりモデル化の妥当性を確認した。

## 参考文献

- [1] Sumitro, S. and Tsubaki, T.: Microstructure Model of Steel Reinforced Concrete, Proc. of the 50th Annual Conf. of JSCE, 5, pp.350-351, 1995.
- [2] 趙 力采・小林一輔：鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法に関する研究，コンクリート工学，Vol.17，No.9，pp.87-95，1979.
- [3] 増田健一・魚本健人・西村次男：鋼繊維補強コンクリートの引張特性と繊維種類，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，5，pp.272-273，1992.
- [4] JCI: 繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準，JCI-SF，pp.25-26，1984.
- [5] Naaman, A.E. and Shah, S.P.: Pull-out Mechanism of Steel Fiber-Reinforced Concrete, J. of Struct. Engrg., Vol.102, No.8, pp.1537-1541, 1976.

表-4 シミュレーションで用いた材料定数

載荷方法	供試体	$f_c$ (kgf)	$f_t$ (kgf)	$u_c$ (mm)	$u_p$ (mm)
一軸引張	H-SF1,2	26.0	21.0	0.10	0.50
	N-SF1,2	18.0	17.0	0.12	0.50
せん断	H-8	20.0	16.0	2.0	4.0
	N-8	17.0	15.0	3.5	5.0