

鋼繊維の付着特性と鋼繊維補強コンクリートの力学的特性との関係

Relationship of Mechanical Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete and Bond Property of Steel Fibers

趙 力 采*

Ryokche CHO

1. ま え が き

鋼繊維補強コンクリート (以下, SFRC と表す) の重要な力学的特性の一つは, ひびわれ発生後変形が相当に進行しても優れた耐力を有する点である。この特性は用いる鋼繊維の混入率のもとより, 鋼繊維の形状, 寸法および材質等によって著しく相異なることが指摘されている。とくに後者の鋼繊維に関する諸要因が上記の変形特性に及ぼす影響は鋼繊維の付着特性と密接に関係があると思われる。SFRC のような複合体中の鋼繊維の付着性状を直接的に把握することは不可能に近いが, この複合体として力学的挙動と素材としての繊維の付着特性を関連づけようとする試みはすでに行われている。しかし両者の関係を明確にしたものは見当たらない。

本研究では, 引張強度の異なる 3 種の素材をせん断して製造した形状特性と材質の異なる鋼繊維を含む計 8 種の鋼繊維を用いて, 直接引張および曲げ試験方法による鋼繊維の付着試験を行うとともにこれらの繊維を用いた SFRC の強度及び変形特性を検討した。

また, 上記の試験結果に基づき, 鋼繊維のマトリックスからの引き抜け特性と SFRC の強度および変形状におよぼす鋼繊維の形状および材質の影響をそれぞれ検討すると共に素材としての繊維の付着特性と複合体としての SFRC の力学的挙動との関係を詳細に検討した。さらに, それらの考察に基づき, 直接引張および曲げ試験の 2 種の付着試験方法についても検討を加えた。

2. 実験の概要

(1) 鋼繊維 実験に使用した鋼繊維の種類および形状寸法は表 1 に示すとおりである。すなわち引張強度が 40~50 kg/mm², 70~80 kg/mm² および 110~120 kg/mm² で, しかも引張強度が大きいものほど硬度が大となる 3 種の素材から製造したストレート状鋼繊維 (No. 1~No. 3) および波形の鋼繊維 (No. 4~No. 6) の計 6 種を基準としている。なお, No. 7 はカットワイヤーにインデント加工を施したもの, No. 8 は片端に小突起を有するせん断鋼繊維である。

(2) 付着試験方法 a) 引張試験: 供試体はモルタルの直接引張試験に用いられるブリケット供試体と同

様な形状寸法のものである。しかし, 図 1 (a) に示すように最小断面部分においてスリットに 2 分されており, 鋼繊維はスリットに 1.5 cm 間隔で正方形を構成するように設けられた 4 個の穴を横切って引張応力方向に配置した。なお, これらの鋼繊維の埋込み長さ (測定区間) はいずれも 10 mm 一定とした (図 1 (b))。

b) 曲げ試験: 供試体はセメントの強さ試験の曲げ強度用試験体と同様な形状寸法 (4×4×16 cm) の角柱体であって, 図 2 (a) に示すように長さ中央においてスリットによって 2 分されている。鋼繊維は図 2 (b) に示すように, スリット下縁 (載荷時の引張縁) から 6 mm の高さに 8 mm 間隔に設けられた 4 個の穴を横切って引張応力方向に配置した。

c) モルタルの配合: モルタルは水セメント比を 50

表 1 使用した鋼繊維の諸元

繊維の種類	断面または直径 (mm)	長さ (mm)	形状特性	引張強度 (kg/mm ²)
No. 1	0.5×0.5	30	断面: 正方形に近く滑らかな表面	40 ~ 50
No. 2	0.5×0.5	30	断面: 正方形に近く滑らかな表面	70 ~ 80
No. 3	0.5×0.5	30	断面: 正方形に近く滑らかな表面	110 ~ 120
No. 4	0.5×0.5	30	波 山間隔が約 4 mm の波形	40 ~ 50
No. 5	0.5×0.5	30	波 山間隔が約 4 mm の波形	70 ~ 80
No. 6	0.5×0.5	30	波 山間隔が約 4 mm の波形	110 ~ 120
No. 7	0.55	30	2mm 間隔にインデント加工のデフォーメーションあり	110 ~ 120
No. 8	0.35×0.7	30	一方の端部にせん断時の突起あり	70 ~ 80

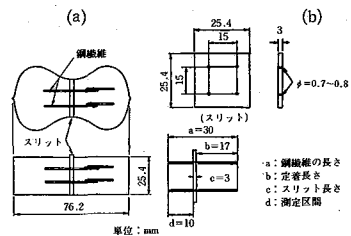


図 1 直接引張試験用供試体の形状寸法と鋼繊維の配置

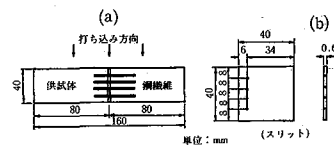


図 2 曲げ試験用供試体の形状寸法と鋼繊維の配置

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

研究速報
 %一定とし、セメント砂比が1:1.7のものを使用した。
 なお、セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は豊浦標準砂を用いた。

d) 荷重試験方法：試験機は容量10tの変位制御型試験を用い、荷重速度はいずれの付着試験の場合もクロスヘッドの速度を0.5mm/minとした。一方、曲げ試験は3等分点2点荷重(スパン:12cm)方法によって実施した。

(3) SFRCの曲げ試験方法 SFRCの曲げ荷重-変形特性の試験には、水セメント比が50%で粗骨材最大寸法が15mmのコンクリートマトリックスに表1の8種の鋼繊維をそれぞれ1%、1.5%および2%混入したSFRCを製造して成形した10×10×40cmの角柱体を用いた。曲げ荷重試験は材令2週で3等分点2点荷重(スパン:30cm)により行った。なお、曲げ試験実施後の切片を用い、直接二面せん断試験方法により、せん断強度も求めた。

3. 実験結果

(1) 付着特性および変形特性の評価方法

a) 付着特性の評価方法：鋼繊維の付着の強さは単位表面積当たりの引き抜き力、すなわち付着強度で表すのが一般的であるが、鋼繊維の断面が一定でないのを考慮して、ここでは試験後の4本の鋼繊維の実長の総和で引き抜き力を除して得られる付着力(kg/cm)で表すこととした。したがって、鋼繊維の付着特性の評価は付着力-すべり曲線に基づき、図3(a)に示すように最大付着力(P)とそれぞれすべり量が0.5、1.0および2.5mm時までの付着力-すべり曲線と横軸(すべり量軸)とに囲まれる面積、A、BおよびCを求めて行うこととした。なお、すべり量が0.5mmと2.5mmとした理由はSFRCの最大曲げ荷重時のひびわれ幅が一般に0.2~0.5mmの範囲内で生じることを考慮して前者の値を定め、後者は曲げ供試体のたわみ量が2mmの時のひびわれ幅にほぼ等しい値となることによる。一方、曲げ試験によって求まる付着力とすべり量は直接引張試験による両者の値と異なり、曲げ荷重とクロスヘッドの変位

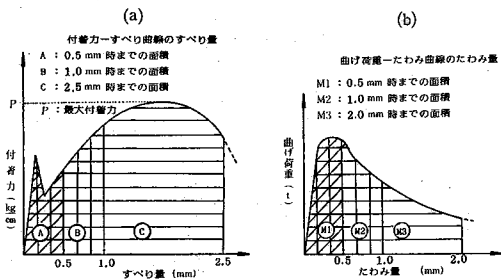


図3 鋼繊維の付着特性とSFRCの変形特性の評価方法

量との関係が得られることになるが、ここでは繊維間の付着特性の相対評価は可能であるので補正を行わない値を用いた。

b) SFRCの強度と変形特性の評価方法

強度特性はプレーンコンクリートの強度に対するSFRCの曲げ強度とせん断強度の絶対値との比として表し、変形すなわち、曲げタフネスに対する評価は図3(b)に示すように、それぞれたわみ量が0.5、1.0および2.0mm時までの曲げ荷重-たわみ曲線とたわみ軸とに囲まれる面積、M1、M2とM3を用いることにした。

(2) 付着試験結果と考察 図4(a)と図4(b)はそれぞれ8種の鋼繊維の直接引張および曲げ試験方法による付着力-すべり曲線を示したものである。これからの図から明らかなように、鋼繊維の付着特性の相異は、試験方法に拘らずすべり開始時における付着力は大差ないが、その後のすべり量の増大に伴う付着力の増加の程度に顕著に現れるようである。

すなわち、すべり開始後いったん付着力が低下し、その付着力まで耐力を回復しない、主としてストレート状鋼繊維とすべり開始時の付着力以上の耐力を示す異形鋼繊維の付着力-すべり性状の差異が捉えられていることがわかる。

表2は以上の引張および曲げ試験による付着力-すべり曲線に基づき、(1)a)の付着特性の評価方法に準じて求めた付着特性値、面積A、BおよびCならびに最大付着力を示したものである。一方、図5は表2の付着特性値、すなわち付着力-すべり曲線の面積と最大付着力との関係の1例を曲げ試験の結果について示したものである。この図から、本実験に用いた範囲の鋼繊維の付着特性は、最大付着力の大きいものほど各すべり量時までの

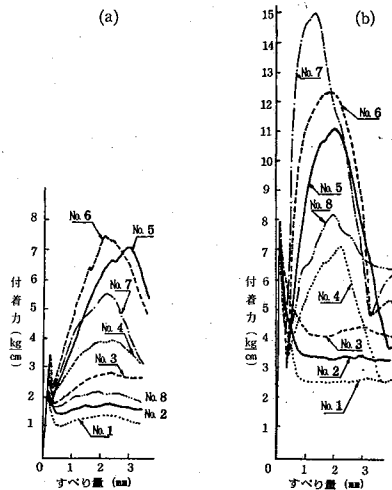


図4 引張および曲げ試験による鋼繊維の付着力-すべり曲線

付着力-すべり曲線の面積も直線的に増大することならびにストレート状および波形状鋼繊維においては、鋼繊維自体の引張強度が大きいものほど、同一引張強度でも前者に比し後者ほど、付着特性値が増大すること、などである。

表2 2種の付着試験による鋼繊維の付着特性値

鋼繊維種別		引張試験による付着特性値			
		面積 A	面積 B	面積 C	最大付着力 (P)
スト レ ー ト	No.1	0.69	1.32	3.35	1.62
	No.2	0.80	1.55	3.95	1.93
	No.3	1.02	2.09	6.51	3.55
波 形 状	No.4	0.86	2.31	7.52	4.16
	No.5	1.01	2.89	11.37	7.06
	No.6	1.26	3.31	11.66	7.11
イ ン フ レ ット	No.7	1.10	3.10	9.98	5.21
端 切 取	No.8	0.84	1.68	4.67	2.37

鋼繊維種別		曲げ試験による付着特性値			
		面積 A	面積 B	面積 C	最大付着力 (P)
ス ト レ ー ト	No.1	1.92	3.78	6.24	4.87
	No.2	2.38	4.27	7.89	5.25
	No.3	2.71	5.26	11.15	6.80
波 形 状	No.4	2.07	6.01	16.04	7.08
	No.5	2.51	6.95	24.28	10.60
	No.6	2.87	7.19	23.73	11.78
イ ン フ レ ット	No.7	3.53	9.95	24.12	14.95
端 切 取	No.8	2.90	6.50	19.07	8.24

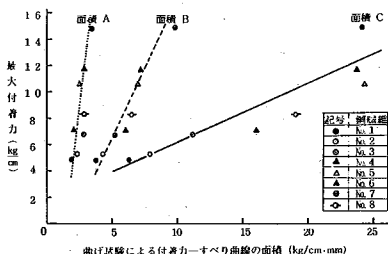


図5 付着力-すべり曲線の面積と最大付着力との関係

(3) SFRCの曲げ試験結果と考察 図6はNo.1~No.8の鋼繊維を用いたSFRCの典型的な曲げ荷重-たわみ曲線の1例を $V_f=1.5\%$ の場合について示したものであるが、鋼繊維の種類により曲げ荷重-たわみ性状が相当に異なってくるのがわかる。図7に本実験で得られた繊維混入率1.0%の場合のSFRCの曲げ荷重-たわみ曲線に基づき、(1) b)の評価方法に準じて求めた曲げ強度と曲げタフネス M1, M2 および M3 との関係の1例を示したものである。本実験の範囲内において、曲げ強度が高いSFRCほど曲げタフネスも大きく、ストレート状および波形状鋼繊維では繊維の引張強度が高いものほど前2者の値が大きくなるのがわかる。

4. 鋼繊維の付着特性とSFRCの強度との関係

(1) 鋼繊維の付着特性とSFRCの強度 表3は2種の付着試験方法による付着特性値に対する繊維混入率1.0, 1.5および2.0%のSFRCの曲げ強度ならびに繊維混入率1.0%のSFRCの曲げ試験後の切片によるせん断強度との相関係数を示したものである。

これらの結果より明らかなことは、1) いずれの付着試験方法によって求めた付着特性値もSFRCの強度との相関性が認められること、2) 繊維混入率の如何に拘

わらず、付着力-すべり曲線のすべり量が0.5mm時までの面積Aが強度と最も相関性が高く、順次面積B、面積Cと相関性が低くなること、3) 最大付着力と強度との相関性も認められるが、面積Aに対する値に比して総じて低い値を示すこと、4) 引張試験に比し、曲げ試験による付着特性値がSFRCの強度との相関性が高いこと、などである。2)の面積Aが最も相関性が高いという結果は、SFRCのせん断強度における場合と同様に、曲げ強度の場合も図6に示されるように、最大強度がスパン中央のたわみ量が0.1~0.3mmの時点、すなわち、ひびわれ幅も小さく鋼繊維のクラック面からの拔出量も小さい時点であると考えられることから、面積Aが最も相関性が高く、順次すべり量が多い時点までの面積B、Cと相関性が低くなったと考えられる。また、3)の傾向は最大付着力が、相当に大きいすべり量時に生ずる繊維が数種存在することによると思われる(図4参照)。さらに、4)の結果は、SFRC中の鋼繊維が3次元ランダム状態で分散しているため、マトリックスからの鋼繊維の拔出しが、曲げ試験における場合と類似した機構で生じる

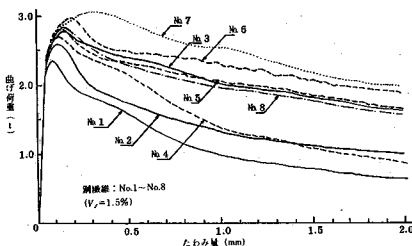


図6 8種の鋼繊維を用いたSFRCの曲げ荷重-たわみ曲線

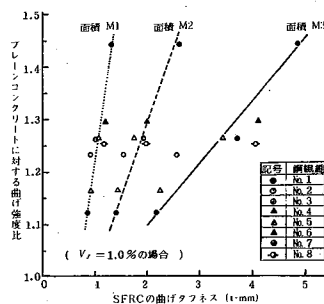


図7 SFRCの曲げ強度と曲げタフネスとの関係

表3 鋼繊維の付着特性値とSFRCの強度との相関係数

SFRCの付着特性	$V_f=1.0\%$ (I) と $V_f=2.0\%$ (II) のSFRC 曲げタフネスに対する相関係数 (r)						SFRCの種類
	M1: 0.5mm時		M2: 1.0mm時		M3: 2.0mm時		
面積 A	0.78	0.98	0.74	0.94	0.74	0.85	(I)
面積 B	0.67	0.84	0.56	0.70	0.63	0.82	
面積 C	0.56	0.69	0.48	0.64	0.55	0.73	
最大付着力 (P)	0.51	0.83	0.47	0.73	0.52	0.83	(II)
面積 A	0.69	0.78	0.95	0.83	0.78	0.85	
面積 B	0.58	0.67	0.82	0.75	0.56	0.60	
面積 C	0.37	0.46	0.73	0.71	0.50	0.57	
最大付着力 (P)	0.44	0.55	0.70	0.84	0.50	0.67	

研究速報

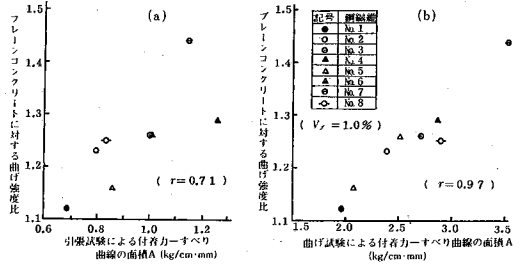


図8 SFRCの曲げ強度と付着面積Aとの関係 ($V_f=1.0\%$ の場合)

表4 SFRCの曲げタフネスと鋼繊維の付着特性値との相関係数

試験方法	SFRCの強度特性	曲げ強度に対する相関係数 (r)			せん断強度に対する相関係数 (r)
		$V_f=1.0\%$	$V_f=1.5\%$	$V_f=2.0\%$	
引張試験	面積 A	0.71	0.79	0.98	0.83
	面積 B	0.58	0.63	0.81	0.78
	面積 C	0.57	0.58	0.71	0.70
	最大付着力 (P)	0.50	0.59	0.66	0.66
曲げ試験	面積 A	0.97	0.87	0.95	0.92
	面積 B	0.87	0.67	0.89	0.90
	面積 C	0.67	0.58	0.78	0.82
	最大付着力 (P)	0.87	0.78	0.91	0.88

ことによると考えられる。ここで、図8に1例として、繊維混入率が1.0%の場合のSFRCの曲げ強度と最も相関性が高い付着特性値Aとの関係を引張および曲げ試験の両者を対比して示しておく。以上の結果は、鋼繊維の付着特性とSFRCの強度とが密接に関連していることを指摘するものである。

(2) 鋼繊維の付着特性とSFRCの曲げ変形特性
表4は繊維混入率が1.0および2.0%のSFRCの0.5, 1.0および2.0mmのたわみ量時の曲げタフネス, M1, M2とM3に対する2種の試験方法による付着特性値との相関係数を示したものである。これらの結果より明らかなことは、前述のSFRCの強度特性に対する結果と同様に1) いずれの試験方法による付着特性値もSFRCの曲げ変形特性と高い相関性を有すること、2) 繊維混入率の如何に拘らず、付着力-すべり曲線のすべり量が0.5mm時までの面積Aが曲げ変形特性と最も相関性が高く、順次面積B, 面積Cとその値が低くなること、3) 曲げ変形特性に対する最大付着力の相関性は面積Aにおける値に比し顕著に低いこと、4) 引張試験に比し、曲げ試験による付着特性値がSFRCの曲げ変形特性との相関性が高いこと、などである。なお、2)の傾向すなわちSFRCのたわみ量が相当に大きく、ひびわれ幅も相当に大きいと考えられる時点でも、付着試験におけるすべり量が0.5mm時までの付着力-すべり曲線の面積Aがその曲げタフネスと最も相関性が高くなる理由については現在明確ではない。ここで、図9に繊維混入率が1.0%のSFRCの0.5mmのたわみ量時の曲げタフネスM1に対する2種の付着試験方法による面積Aと

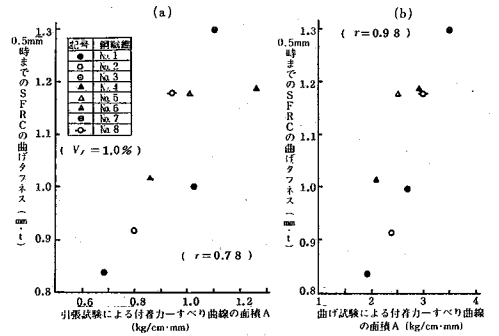


図9 0.5mm時までのSFRCの曲げタフネスと付着面積Aとの関係

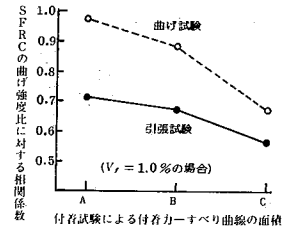


図10 SFRCの強度との相関による付着試験方法の評価

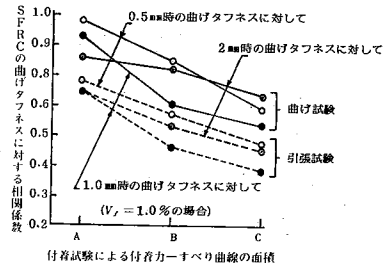


図11 SFRCの曲げタフネスとの相関による付着試験方法の評価

の関係を示しておく。

5. 付着試験方法の評価

図10および図11はそれぞれ表3と表4に基づき、SFRCの曲げ強度と曲げタフネスに対する2種の試験方法による付着特性値、面積A, BおよびCとの相関係数との関係の1例を示したものである。

これらの図より明らかなように、曲げ試験によって得られる付着特性値は引張試験による値に比し、SFRCの曲げ強度ならびに変形特性とよい相関を示すことがわかる。このことは、既述したように、SFRC中の鋼繊維が3次元ランダム状態で分散しているため、マトリックスからの鋼繊維の抜け出しが、曲げによる付着試験における場合と類似した機構で生じることによると考えられ、鋼繊維の付着試験方法としては曲げ試験による方法が優れていること示すものとする。

(1983年1月31日受理)