高強度コンクリートの鋼繊維補強に対する 繊維形状および混入率の影響

牛田耕悟^{*1}・Nasir, S.^{*2}・上原匠^{*3}・梅原秀哲^{*4}

概要 本研究は、鋼繊維補強コンクリートの性能を左右すると考えられる影響因子として、鋼繊維の形状および混入率を取り上げ、これらが高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響の解明を目的としたものである。まず、形状が異なる鋼繊維を対象に、高強度モルタル下での付着試験を行い、繊維形状と付着性能について考察を行った。更に、繊維形状および混入率が鋼繊維補強した高強度コンクリートのフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響について、実験結果をもとに考察を行った。また、これらの実験結果および考察より、繊維形状の補強効果を考慮した繊維混入率についての検討を行った。

キーワード：繊維形状、繊維混入率、高強度コンクリート、付着性能、曲げ性能

1. はじめに

高強度コンクリートは、構造物の大型化、大スパン化、および耐用年数の長期化など、構造物自体の高性能化が実現できることから、その使用頻度は高くなっている。この傾向は、今後も更に拡大することが想定されるが、終局時の靱性性能の確保という点に関しては課題が残る。その改善方法の1つとして、鋼繊維を混入することが有効とされているが、これまでの研究から、高強度コンクリートを対象としたものは比較的小さいのが現状である¹⁾²⁾。また、補強材料として使用される鋼繊維にも、形状が異なる多種多様の繊維が製造・市販されているが、繊維自体の特徴とその効果に関する研究も少ない³⁾。特に、繊維形状がコンクリートの物性に及ぼす影響については、繊維混入率が一定のもとでも、混入本数が異なるため、繊維形状と混入率の関係を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、繊維形状が異なる鋼繊維と高強度コンクリートを用いた鋼繊維補強コンクリートを対象に、繊維形状が高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響をフレッシュおよび硬化の両面から検討した。**図-1**に本研究の検討内容を示す。本実験で採り挙げた影響因子は図に示す通りである。まず、高強度コンクリートを対象とした実験に先立ち、鋼繊維の付着性能を把握する目的で、形状の異なる鋼繊維を対象に高強度モルタル下での付着試験を行い、繊維形状と付着性能について検討した。次に、繊維形状および混入率が鋼繊維補強した高強度コンクリートのフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響について、実験結果をもとに考察を行った。また、これらの実験結果および考察より、繊維形状の補強効果を考慮した繊維混入率についての検討を行った。

能について検討した。次に、繊維形状および混入率が鋼繊維補強した高強度コンクリートのフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響について、実験結果をもとに考察を行った。また、これらの実験結果および考察より、繊維形状の補強効果を考慮した繊維混入率についての検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

2.1.1 鋼繊維

本実験に用いた鋼繊維の種類を**図-2**に、それらの機械的性質を**表-1**に示す。使用した鋼繊維は未加工のストレートを1種類、表面加工を施した繊維2種類（ウェービー、インデント）、端部加工を施した繊維3種類（フック-1、フック-2、ドッグボーン）の合計6種類である。フック-1は、数個の繊維が水溶性接着剤により結合されている。鋼繊維の長さは、繊維形状（長手方向の加工形状、断面形状）の違いが高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響を検討するため全て30mm一定とした。また、繊維長と繊維直径の比を表すアスペクト比（L/d）はストレートを除き約50となるものを選定した。

2.1.2 コンクリート材料

供試体製作のために使用したコンクリートは、圧縮強度が80N/mm²程度の高強度コンクリートである。セ

*1 名古屋工業大学大学院工学研究科（正会員） 〒466-8555 愛知県名古屋市中区御器所町
*2 名古屋工業大学大学院 VBL 研究員（正会員） 〒466-8555 愛知県名古屋市中区御器所町
*3 名古屋工業大学工学部助教授（正会員） 〒466-8555 愛知県名古屋市中区御器所町
*4 名古屋工業大学大学院工学研究科教授（正会員） 〒466-8555 愛知県名古屋市中区御器所町

図-1 本研究の検討内容

図-2 使用した鋼繊維の種類（長さ：30mm）

メントには早強ポルトランドセメント（密度：3.12g/cm³，比表面積：4520cm²/g），細骨材には豊田産山砂（密度：2.56g/cm³，吸水率：1.56%，粗粒率：2.76），粗骨材には瀬戸産砕石（密度：2.72g/cm³，吸水率：0.63%，粗粒率：6.74，最大寸法 15mm）を使用した。また混和剤には，ポリカルボン酸系グラフトコポリマーを主成分とする高性能減水剤を使用した。

2.1.3 高強度コンクリートの配合

高強度コンクリートの配合を表-2 に示す。配合は水セメント比を 35%，細骨材率 63%とし，高性能減水剤をセメントに対して 1.0%混入した。また，鋼繊維は容積混入率で，1.0%，1.5%，2.0%の 3 水準に設定した。なお，本実験では繊維形状に着目したため，混和剤によるフレッシュ性状の調整は行わなかった。

コンクリートの練混ぜ工程を図-3 に示す。練混ぜにはパン型強制練りミキサ（容量：50 リットル）を使用した。また，試料採取方法ならびに締固め方法に関しては，JCI-SF2「繊維補強コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方」⁴⁾に準拠して行った。

表-1 鋼繊維の機械的性質

加工部分	シリーズ	寸法 (mm)	断面積 (mm ²)	断面形状	アスペクト比 (L/d)	引張強度 (N/mm ²)
無し	ストレート	φ 0.4*×30	0.13	三日月	75.0	520
	ウェービー	0.5×0.5×30	0.25	矩形	53.2	589
	インデント	φ 0.6*×30	0.28	矩形	50.0	1228
端部	フック-1	φ 0.6*×30	0.28	円形	50.0	1100
	フック-2	φ 0.6*×30	0.28	矩形	50.0	1080
	ドッグボーン	φ 0.6*×30	0.28	三日月	50.0	780

注) 表中の*印は換算直径を表示

表-2 高強度コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	S.F (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	S	G	Ad	S.F
35	63	-	182	520	978	610	5.2	-
		1.0			962	600		78.5
		1.5			954	595		117.75
		2.0			946	590		157

W：水，C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材，Ad：高性能減水剤，S.F：鋼繊維

2.2 鋼繊維の付着性能調査

鋼繊維補強した高強度コンクリートの各性状調査に先立ち，鋼繊維の付着性能を把握するために，高強度モルタルをマトリックスとした引抜き試験体を製作し付着試験を行った。試験体の形状寸法を図-4 に示す。試験体は予め繊維を貫通させた仕切り板を型枠内に設置し，繊維のズレが生じないようにモルタルを流し込んで製作した。繊維の埋設長さは仕切り板を中心に上下とも 15mm である。モルタルの配合を表-3 に示す。モルタルは，高強度コンクリートを想定して水セメント比を 35%，セメント細骨材比を 53%とした。なお，試験方法は，JCI-SF8「繊維の付着試験方法」⁴⁾を参考に，写真-1 に示す試験装置（名称：SV-52N 型引張圧縮試験機）を用いて実施した。

* 鋼繊維の投入時間は、最初の60秒間に手作業で行い、残り30秒間は鋼繊維が十分混ざることを目的に設定

図-3 コンクリートの練混ぜ工程

表-3 高強度モルタルの配合

W/C (%)	C/S (%)	Ad (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	Ad
35	53	1.0	237	678	1279	6.78

W：水，C：セメント，S：細骨材，Ad：高性能減水剤

2.3 高強度コンクリートの性状調査

2.3.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの性状調査には、施工性の目安となるスランプおよび空気量を対象に試験を実施した。スランプ試験は、JIS A 1101-1998「コンクリートのスランプ試験方法」に、空気量試験は、JIS A 1128-1999「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験（空気室圧力方法）」に準じて行った。また、ファイバーボールなどの材料分離の有無に関しては目視判断とした。

2.3.2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度試験

圧縮試験には、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いた。試験方法は、JIS A 1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて、供試体側面にワイヤーストレインゲージを貼り付け、応力とひずみの関係から静弾性係数の算定を行った。

(2) 曲げ強度試験

曲げ試験には、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いた。試験方法を図-5に示す。載荷方法は三等分点載荷とし、スパン中央点の変位を測定するため供試体側面両側に変位計（精度：1/1000mm）を設置した。試験においては、荷重と変位の関係を測定し、曲げ強度および曲げタフネスを算定した。なお、試験方法は、JCI-SF4「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」⁴⁾に準拠して行った。

3. 実験結果

3.1 鋼繊維の付着性能

マトリックスとして用いた高強度モルタルの強度試験は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の3本の試験体で行い、圧縮強度の平均値は 85.4N/mm^2 、静弾性係数の平均値は 32.0kN/mm^2 であった。

表-4に付着試験結果を示す。表中の最大荷重値は3

図-4 引抜き試験体の形状寸法

写真-1 付着試験状況

体の平均を示す。ストレートは110～146N（平均値：132N）、ウェービーは171～195N（平均値：183N）、インデントでは316～362N（平均値：332N）、フック-1は225～232N（平均値：228N）、フック-2は190～253N（平均値：224N）、ドッグボーンでは339～433N（平均値：380N）の値となり、各試験体間での差はドッグボーンで94Nと最も高く、また、フック-1では7Nと低く、繊維によってバラツキの程度が異なることが明らかとなった。

埋設した鋼繊維の試験後の状態は、写真-2に示すように、ストレート、ウェービーおよびドッグボーンは破断しており、インデント、フック-1、フック-2は伸びきるように引抜けていた。特にフック-1およびフック-2は、端部のフック加工が変形しており、ストレート状になって引抜けているのが観察された。また、インデントに関しては、繊維表面に加工されている凹凸部に、引抜かれた際に削り取られて付着したと考えられる微量のモルタルが観察された。

図-6に付着試験による引張荷重とすべり量の関係の一例を示す。この結果は、鋼繊維補強コンクリートにひび割れが発生した後の挙動を支配すると考えられ

図-5 曲げ供試体設置状況

単位：mm

表-4 付着試験結果

シリーズ	最大荷重(N)	破壊形態
ストレート	132	破断
ウェービー	183	破断
インデント	332	引抜け
フック-1	228	引抜け
フック-2	224	引抜け
ドッグボーン	380	破断

図-6 引張荷重とすべり量の関係

る。いずれの試験体も载荷初期（75N 付近）においては、荷重に対するすべり量が直線的に推移していることから、繊維、モルタル、およびその界面での性状は弾性的な挙動によって支配されていると考えられる。従って、この段階における繊維形状の影響はほとんどないと言える。

最大荷重に到達するまでの挙動は、繊維によって異なるが、繊維自体の強度に加え、繊維とモルタル間の付着力によってその増進が図られると考えられる。すなわち、マトリクス強度が高いことから繊維自体が受け持つ引張力が大きく影響しており、繊維強度と付着強度の複合作用によって最大荷重値が決まると言える。

破断した繊維に共通していることは、繊維自体の引張強度が $520 \sim 780 \text{ N/mm}^2$ と比較的小さく（表-1 参照）、荷重に対するすべり量も他の繊維と比較し小さかったことである。ウェービーおよびドッグボーンのすべり曲線はほぼ直線的であり、その推移形状も酷似している。またこれらの繊維は、付着切れによるすべり量の

写真-2 試験後の繊維状況

増加がほとんど確認できない状態で破断に到っており、繊維とモルタル間の付着は適切であったことがわかる。ここで、付着切れとは、繊維とモルタル間の適切な付着能力がなくなり、両者の相対的なズレによってすべり量が増加していくことを示す⁵⁾。ドッグボーンの最大荷重値が他の繊維よりも大きかったのは、繊維端部が直径に比べ広く、スプーン状に加工されているため、モルタルとの付着面積が増加し、引張荷重に対して十分抵抗できたからではないかと考えられる。ウェービーは、繊維表面に6つの波型加工が施されているが、繊維強度が小さいため最大荷重値はドッグボーンと比較し約半分にとどまっている。ストレートに関しては、前述した2つの繊維とは異なり、付着切れを生じた後（100N 付近）の荷重増加は小さく、すべり量が急激に増加している。一般に、弾性的な挙動に支配されている载荷初期段階では、繊維とモルタル間には弾性せん断応力が作用しており、载荷が進行し付着切れを生じる段階では、この応力が摩擦せん断へ移行する⁵⁾とされている。ストレートは繊維自体に一切の加工が施されていないため、付着切れを生じた後は繊維表面のみで抵抗していたと考えられる。しかし、マトリクス強度が高いことから、摩擦によるせん断応力が繊維強度を上回り、最終的に繊維は降伏し破断に到ったと考えられる。

一方、引抜けを生じた鋼繊維に共通していることは、繊維自体の引張強度が $1080 \sim 1228 \text{ N/mm}^2$ と比較的大

図-7 スランプ試験結果

きいことである(表-1 参照)。また、前述したように、試験後の繊維状態がほぼストレート状に伸展していたことから、これらの鋼繊維は、ある程度の付着能力を保持しながら、適度な塑性変形を伴って抵抗する構造を有することがわかる。これらのすべり曲線は、引抜けるまでにいくつかの波を描きながら推移しているのが特徴的であり、特にフック-2は、荷重に小刻みな跳躍が観察できる。これは、この繊維の加工形状によるものと考えられる。すなわち、フック-2は、繊維両端部の加工が特異な構造を有しており、フック加工だけでなくわずかな段差が施されている。従って、付着切れを生じた後も、マトリックス内部で引っ掛かりながら引抜けていたのではないかと推察できる。またインデントに関しては、繊維表面に凹凸加工が施されているため、引張荷重への抵抗が繊維全体で均一に働き、付着切れを生じた後の摩擦せん断応力への抵抗も大きくなったと考えられる。従って、フック-1およびフック-2のような端部加工が施してある繊維よりも、高い引張荷重値が計測されたのではないかと考えられる。

以上より、高強度マトリックス下での鋼繊維の付着性能には、繊維の引張強度ならびに加工形状が大きく影響していることが確認された。特に、加工を施した鋼繊維は、マトリックス強度に起因する付着性能は十分と判断されるが、付着能力と繊維自体の引張強度の差によって破壊形態が異なることがわかった。そこで、これらの鋼繊維をコンクリート部材に使用した場合、最大荷重後の挙動に異なる傾向が見られると推察される。すなわち、ストレート、ウェービー、ドッグボーンでは、繊維破断による耐力力の低下によって、ピーク後の荷重低下が大きく、靱性性能の付与には乏しい繊維と推察でき、インデント、フック-1、フック-2に関しては、破断することなく徐々に引抜けていくため、ピーク後の荷重低下は緩やかになり、靱性性能に優れているのではないかと判断できる。なお、本実験は、繊維1本のみを埋設した単純引張による付着試験であるが、実構造物では、曲げならびにせん断を伴う引

張力が作用するため、鋼繊維の付着性能はさらに複雑化するものと考えられる。また、コンクリート内には多量に繊維が混入されているため、機械的な複合作用が期待でき補強効果も向上すると推察できる。従って、繊維本数、すなわち、繊維混入率を十分に考慮した付着性能を検討していく必要があると考えられる。

今回の付着試験結果から、繊維強度の高強度化は、更なる荷重の増進を可能にすると考えられることから、80N/mm²程度の高強度マトリックス下においては、繊維自体の引張強度が1000N/mm²程度は必要と判断される。

3.2 高強度コンクリートの諸性状

3.2.1 フレッシュコンクリートの性状

高強度コンクリートの基本的な物性を調査するために製作したベースコンクリート(繊維未混入)のスランプは24.0cm、空気量は3.0%であった。繊維を混入したコンクリートは、全ての繊維ならびにその混入率において、ファイバーボールおよび材料分離の発生は観察されなかった。

(1) スランプ

図-7は各鋼繊維を1.0%、1.5%、2.0%混入したコンクリートのスランプを示したものである。全体的な傾向として、混入率が増加すると、繊維形状に関わらずスランプは減少していくことがわかる。ベースコンクリートのスランプが24cmと高い場合、鋼繊維を1.0%混入した場合を比較すると、ストレートを除き、この程度の混入率ではスランプの減少程度は約2cmと小さく、繊維形状および混入率による影響はほとんどないと言える。しかし、混入率1.5%および2.0%では、各鋼繊維のスランプの低下傾向にバラツキが生じていることから、繊維形状の影響が明瞭に表れていると言える。なお、ストレートに関しては、各混入率において比較的低いスランプを示している。これは繊維の換算直径が小さいため(表-1 参照)、同等な混入率でも単位容積あたりの混入本数が増加したからと考えられる。この場合においても、繊維混入率の増加に伴い、比例してスランプの低下が確認された。混入率1.0%から1.5%、また、1.5%から2.0%混入した場合のスランプ性状は、インデントを除き、その減少程度(傾き)が異なるものの、混入率を増加させていくことによって共通した傾向が確認できる。しかし、インデントに関しては、1.0%から1.5%混入した場合の減少程度が大きく、2.0%混入した場合においても混入率1.5%とほとんど差がないことがわかる。繊維の断面形状に着目すると、今回の実験結果からは、円に近い形状と矩形、特に長方形に近い形状においては、スランプの低下現象に違いがあると推察される。特に、フック-1、ドッグボーン

表-5 各鋼繊維混入率における繊維の総表面積

シリーズ	混入率 (%)	総表面積* (m ²)	シリーズ	混入率 (%)	総表面積* (m ²)
ストレート	1.0	97	フック-1	1.0	68
	1.5	146		1.5	102
	2.0	195		2.0	136
ウェービー	1.0	80	フック-2	1.0	87
	1.5	121		1.5	131
	2.0	162		2.0	174
インデント	1.0	96	ドッグボーン	1.0	71
	1.5	144		1.5	106
	2.0	192		2.0	141

注) 表中の*印は1m³に対する値を表示

ンに比べ、インデント、フック-2はスランプの低下の割合が大きくなる傾向が示されている。表-5に断面形状を考慮して算定した各鋼繊維の各混入率における総表面積の概算値を示す。概算値は、まず使用した鋼繊維数本から繊維1本あたりの表面積（繊維の断面積と周長、および繊維長から算出）と質量の平均値を求め、次に混入率毎の混入本数を単位量と繊維1本の質量から算出し、その値に鋼繊維1本の表面積を乗じて算定したものである。ストレートの総表面積が他に比べて大きいのは、混入本数の違いによるものである。この表から、繊維の総表面積とスランプの低下には、有意な関係があると判断される。すなわち、断面が円に近い場合では総表面積が小さく、スランプの低下が緩やかであるのに対して、長方形に近い断面ではスランプの低下が大きいと言えよう。これは、断面形状が円形の場合と矩形の場合では繊維の総表面積が異なり、繊維表面に付着するペーストが円形の場合は少なく、矩形の場合では多くなることが要因と考えられる。つまり、表-5に示すように、繊維断面が円形に近い場合（フック-1、ドッグボーン）では、混入率2.0%の場合であっても、その総表面積の増加が小さいため、付着するペースト量、ならびに繊維がマトリックスと接触する部分が小さくなり、スランプの著しい低下が認められず適度なコンシステンシーを確保していたと推察できる。一方、繊維の断面が長方形に近い場合（インデント、フック-2）は、繊維の総表面積、および付着するペースト量が増加するため、これらの繊維混入率を増加させていくことによるスランプの減少程度は顕在化すると推察される。図-8にスランプと鋼繊維総表面積の関係を示す。この図より、総表面積が増加するとスランプが低下することが明らかであり、総表面積はスランプに影響する最も大きな要因と考えられる。ただし、インデントにおいては、スランプの減少傾向が他の繊維と異なることから、スランプ性状には、断面形状に起因する繊維の総表面積に加え、長手方向の加工形状や繊維本数などの影響も大きいと言えよう。

以上より、鋼繊維を混入した高強度コンクリートの

図-8 スランプと鋼繊維総表面積の関係

図-9 空気量試験結果

スランプ性状は、混入する繊維の総表面積、および混入率に最も影響を受けると言える。つまり、同様な加工形状を有する繊維でも、その断面形状が異なればマトリックスとの接触部分（総表面積）も変化するため、スランプの減少程度に差が生じることになる。また、繊維混入率が増加すれば、繊維とマトリックスとの絡まりも顕在化し、フレッシュコンクリートとしての性能低下にもつながる。従って、高強度コンクリートに鋼繊維を混入する場合、その作業性および施工性を考慮し、混入率は1.0～1.5%程度が望ましいと考えられる。また、繊維形状に関しては、繊維断面が円形状に加工されているものが望ましいと言える。なお、2.0%以上の混入率を必要とする場合に関しては、スランプの減少程度が著しくなるとともに、作業性および施工性も低下する。従って、コンクリートの高流動化も考慮する必要があると考えられる。

(2) 空気量

図-9は各鋼繊維の混入率を1.0%、1.5%、2.0%と変化させて混入したコンクリートの空気量を示したものである。全体的な傾向として、フック-1を除く各鋼繊維の空気量は、2.0%混入した場合に最も大きい値を示していることがわかる。また、繊維の加工形状による影響に関しては、比較的混入率が小さい段階、すなわち混入率1.0%における空気量では、端部加工を施したフック-1、フック-2、およびドッグボーンが小さく測定され、表面加工を施したウェービー、インデントお

図-10 圧縮強度試験結果

図-12 曲げ強度試験結果

図-11 各混入率における圧縮強度と空気量の関係

よび無加工であるストレートに関してはやや大きい値を示している。これは、混入本数、および繊維形状による空気の巻込み程度などが原因として考えられる。しかし、スランプのように混入率を変化させたことによる変動はいずれの繊維においても不規則であり、繊維形状による影響においても規則性が見られない。その中でもフック-1は、各混入率における変動が比較的小さく、混入率 1.0%を除いては、ベースコンクリートとほぼ同じ値を示している。つまりフック-1に関しては、他の繊維に比べて繊維混入率の変化が空気量に及ぼす影響は小さいと推察できる。これは、鋼繊維の投入および練混ぜ状態に関係があると考えられる。フック-1は、数個の繊維が水溶性接着剤によって結合されており、ミキサ内での練混ぜ中に均等に分散するように製造されている。また、繊維断面が円形状に加工されていることから、多量に混入しても繊維同士の絡まりが少なく、過剰な空気の巻込みがほとんど発生しなかったのではないかと考えられる。なお、練混ぜ時における繊維同士の絡まりによる空気量の増大は、硬化後の物性に大きな影響を及ぼすと想定されるため、繊維混入率が大きくなる場合は、分散機を使用するなど、分散性を配慮することも空気量を制御する上で重要であると推察される。

以上より、鋼繊維を混入した高強度コンクリートの空気量は、スランプ性状のような繊維自体の影響を明

瞭に確認することが困難であるが、繊維混入率が 2.0%に増加すると空気量もかなり増大すると判断して良いと言える。

3.2.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度特性

図-10 に各鋼繊維で補強した高強度コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。試験結果はそれぞれ 3 本の平均である。ベースコンクリートの圧縮強度は 81.1～82.7N/mm² (平均値：82.2N/mm²)、静弾性係数は 38.9～39.9kN/mm² (平均値：39.4kN/mm²) であった。

鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度は、繊維量を増加させても強度の向上はわずかであり、繊維量を著しく増加させた場合には、締固めを十分に行うことが困難になるため強度が低下することもある⁶⁾と言われている。本実験からも、繊維混入率を増加させていくことによりスランプが低下し、締固めが困難になることが確認され、それに伴ない圧縮強度が低下していく結果となった。しかし、繊維形状の変化が圧縮強度に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。例えば、2.0%混入したドッグボーンの圧縮強度 (57.9N/mm²) は、ベースコンクリートのそれと比較し約 42%低下しているが、これは繊維を多量混入したことによって生じた過剰な空気の巻込み作用によるものと考えられる。すなわち、鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度の低下は、繊維形状に直接関係なく、混入率とそれに伴う空気の

表-6 曲げ強度の範囲と試験体間の強度差

シリーズ	1.0%		1.5%		2.0%	
	曲げ強度の範囲 (N/mm ²)	強度差 (N/mm ²)	曲げ強度の範囲 (N/mm ²)	強度差 (N/mm ²)	曲げ強度の範囲 (N/mm ²)	強度差 (N/mm ²)
ストレート	7.64～8.73	1.09	8.89～11.4	2.51	11.4～12.0	0.60
ウェービー	6.09～7.99	1.90	9.04～11.6	2.56	8.08～10.3	2.22
インデント	9.62～11.7	2.08	11.3～13.4	2.10	10.2～12.0	1.80
フック-1	9.05～13.9	4.85	11.8～15.2	3.40	12.4～15.1	2.70
フック-2	8.35～9.36	1.01	11.0～12.3	1.30	9.37～12.1	2.73
ドッグボーン	8.11～8.90	0.79	9.16～10.9	1.74	9.09～10.8	1.71

図-13 荷重と変位の関係（混入率 1.0%）

図-14 荷重と変位の関係（混入率 1.5%）

巻込み量に依存していると言える。図-11 に各混入率における圧縮強度と空気量の関係を示す。各混入率において、繊維混入率一定のもとでは、概ね空気量の増減に伴ない圧縮強度が減増している傾向が見られる。また、混入率に着目すると、混入率が 2.0%と大きくなると空気量が増加する傾向が確認でき、それに伴ない圧縮強度も低下することがわかる。ただし、鋼繊維の種類に着目した場合、混入率別に示した 3 種の図を観察しても繊維形状による直接的な差は明確に判断できない。従って、今回の実験結果からは、圧縮強度の差異は空気量の増減によるものと判断される。

(2) 曲げ特性

1) 曲げ強度試験結果

ベースコンクリートの曲げ強度は 4.94～6.09N/mm²（平均値：5.47N/mm²）であった。表-6 に、各鋼繊維の 4 体の曲げ強度の範囲と試験体間の強度差を示す。強度差と繊維混入率との間には有意な関係は確認されなかったが、鋼繊維の種類によっては、同一混入率における強度差に差が見られる。これは各鋼繊維の形状に起因すると考えられるが、今回の結果から要因は特定できなかった。本実験からは、フック-1 の強度差が比較的大きいとの結果となった。図-12 に各鋼繊維で補強した高強度コンクリートの曲げ強度試験結果を示す。試験結果はそれぞれ 4 体の平均値である。この図から、繊維形状に関わらず、鋼繊維を混入すれば曲げ強度は向上する傾向にあることが確認できる。しかし、前述した圧縮強度試験結果のように、空気量や施工性

図-15 荷重と変位の関係（混入率 2.0%）

の低下などに起因して、繊維によっては 2.0%混入した場合に強度が低下するものもあり、強度の向上が得られてもその程度は小さいことがわかる。これは、繊維混入率が増加するほど顕在化される傾向にあると言える。すなわち、鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度の増加程度は、繊維混入率に依存しているが、繊維の多量混入は、空気量の増大、または、繊維の分散性能の低下が想定されるため、フレッシュコンクリートにおける材料分離などの目視判断での結果が良好でも、施工時に部材断面内での均一性が損なわれると考えられる。そのため繊維の補強効果が十分に発揮されず、圧縮強度と同様に曲げ強度も低下する傾向になったと考えられる。従って、高強度コンクリートを鋼繊維補強する場合の混入率は、前述したフレッシュ性状、および曲げ強度値の増加程度などに影響する分散性能を十分に考慮する必要がある、本実験からは 1.0～1.5%程

表-7 各鋼繊維混入率におけるひび割れ発生荷重

	1.0%	1.5%	2.0%	平均
ストレート	21.5	23.0	18.0	20.8
ウェービー	16.3	24.3	16.3	19.0
インデント	16.0	23.3	14.8	18.0
フック-1	22.0	22.0	26.0	23.3
フック-2	20.0	23.8	19.8	21.2
ドッグボーン	24.8	26.0	18.5	23.1

単位：kN

度が適当であると言えよう。

今回の結果から、各混入率における強度が最も大きく算定された繊維はフック-1である。フック-1を1.0%混入した強度(11.5N/mm²)は、ストレートを2.0%混入した強度(11.7N/mm²)とほぼ同値である。これは、繊維両端部に施したフック加工と繊維強度によるものと考えられ、コンクリートとの付着が適切であり、ひび割れ発生後の架橋効果が有効に働いたと判断できる。また、ウェービーを2.0%混入した強度(8.97N/mm²)は、1.0%混入したストレート(8.16N/mm²)、フック-2(8.85N/mm²)、およびドッグボーン(8.54N/mm²)の強度と同程度である。従ってウェービーに関しては、多量に混入しても強度の向上はあまり期待できず、混入率は1.5%程度が望ましいと推察できる。なお、鋼繊維補強した高強度コンクリートの曲げ強度は、鋼繊維の付着性能が影響していると考えられ、付着試験結果より破断に到った繊維の曲げ強度は比較的小さく、引抜けを生じた繊維は比較的大きく算定されることが明らかとなった。

2) 荷重と変位の関係

図-13～図-15に、鋼繊維を1.0%、1.5%、2.0%混入した荷重と変位の関係を示す。また表-7に、各鋼繊維混入率におけるひび割れ発生荷重を示す。この表から、全体的な傾向として、混入率が1.0%から1.5%に増加すると、ひび割れ発生荷重も増加することがわかるが、混入率を1.5%から2.0%に増加した場合では、ひび割れ発生荷重は低下する傾向にあることがわかる。これは、前述した曲げ強度試験結果と同様に、繊維を多量混入したことによる空気量の増加、並びに、部材断面内での繊維の分散性能が低下したことに原因があると考えられる。さらに、繊維形状を変化させたことによるひびわれ発生荷重に関してもその改善効果はほとんどないと判断できる。

荷重と変位の関係からは、繊維によって、1.0%および1.5%混入した場合に一時的な荷重低下が見られるが、2.0%混入した場合では、荷重低下は見られず緩やかに増加していることがわかる。また、いずれの鋼繊維を用いても、混入率を増加させることで、ひび割れ発生後の性状が改善される結果となった。しかし図からは、繊維混入率が同程度でも、繊維の加工形状によって、到達する最大荷重値までの挙動に差が生じていることが明らかである。この場合、鋼繊維とコンクリ

図-16 曲げ靱性係数の算定結果

ートとの付着力により、荷重が増進すると考えられることから、繊維形状の影響が大きいと推察される。付着試験では、ドッグボーンの引張荷重値が卓越して計測されたが、この結果は、付着が十分であるため、繊維自体の強度が試験結果に大きく影響したことによるものである。曲げ試験後の供試体破断断面の観察から、ドッグボーンの場合には繊維の破断が多数確認されており、コンクリートでの最大曲げ荷重が低く計測されたことは、繊維の降伏が進行し、最大荷重に到達するまでに一部の繊維が破断したことが原因と考えられる。また、機械的な形状から、付着能力が高いことに加え、ひび割れ発生後には曲げ引張力への抵抗が繊維自体の強度で受け持たれたと考えられる。従って、高強度コンクリートの靱性向上においては、繊維形状の付着力の向上に伴い、繊維自体の引張強度の高強度化が必要と言える。

鋼繊維の付着試験結果から、引抜けを生じた繊維(インデント、フック-1、フック-2)は、繊維の引抜けによって破壊が進行することから、曲げ載荷試験におけるピーク後の荷重低下が比較的小さく、変位曲線の傾きも緩やかに推移し、耐荷性能(曲げタフネス)に優れていると判断できる。一方、付着試験によって破断に到った繊維(ストレート、ウェービー、ドッグボーン)は、ピーク後の荷重低下、並びに最大荷重後の変位曲線の傾きが比較的大きいことから、耐力保持性能に劣っていると判断できる。このように、高強度コンクリートの靱性向上においては、繊維強度の影響が大きく、付着試験結果からも使用する繊維の適正判断が必要であると推察される。

3) 曲げ靱性係数

図-16に、各鋼繊維の荷重と変位の関係から曲げタフネスを算出した曲げ靱性係数値を示す。全体的に、繊維混入率が増加すれば曲げ靱性係数の値も増加する傾向にあると言え、混入率の増加が靱性性能の向上に直接影響していると判断できる。しかし、前述した曲げ強度試験、および荷重と変位の関係と同様に、鋼繊維の付着試験結果も大きく反映されていると言える。すなわち、繊維破断型と引抜け型によって、曲げ試験

におけるひび割れ発生後の最大荷重時を含む荷重変位曲線が大きく異なることから、曲げタフネスによる曲げ靱性係数値にも差が見られる。また、引抜け型においてもフック-1は、繊維混入率の増加が靱性性能の向上に大きく寄与していると判断でき、インデントに関しては、混入率を増加させても曲げ靱性係数値がほとんど変化しないことから、繊維混入率に関係なく、ほぼ一定の靱性性能が確保できると推察できる。

以上より、鋼繊維補強した高強度コンクリートの曲げ特性は、繊維の加工形状、混入率、および引張強度に大きく影響されることがわかった。また、曲げ変形性能は、鋼繊維の付着試験より得られた繊維の特性を大きく反映しており、両者には密接な関係があると言える。これは、繊維破断型、および引抜け型によって、曲げ試験における最大荷重後の挙動に異なる傾向が確認されるため、鋼繊維の付着試験結果から鋼繊維補強した高強度コンクリートの曲げ変形性能が推察でき、かつ、曲げタフネスの良否もほぼ推定することが可能であると言える。また、終局時までの挙動が弾性的であり、かつ破壊現象の予見が比較的困難な高強度コンクリートに鋼繊維補強を試みることは有効であるが、各鋼繊維によって異なる架橋効果を示すことから、高強度レベルのコンクリートには、繊維強度がある程度大きいものが要求されると判断できる。さらには、破断することなく、適度な塑性変形を伴って抵抗する構造を有する鋼繊維を使用することが望ましいと言える。

4. 繊維形状の補強効果と混入率の関連性

コンクリートを鋼繊維補強する場合の繊維の選定とその混入率は、フレッシュ状態における作業性および施工性、並びに硬化後の物性に大きな影響を及ぼすため常時考慮しなければならない。本実験から、アスペクト比に関連する繊維の断面積、および表面積が増加すると、フレッシュ性状には不利な影響を及ぼし、硬化性状には有利な影響を及ぼすという相反する効果を示すことが判明した。すなわち、フレッシュ性状の良否は、繊維形状と混入率に依存しており、繊維の素材や製造方法で決定される繊維強度にはほとんど影響しないと言える。しかし硬化性状に関しては、繊維の形状、および混入率に加え、繊維強度が大きく影響しているため、マトリックス強度と混入率における拘束能力のバランスが重要と言える。また、鋼繊維補強することによって最も改善される性能は、曲げ強度およびタフネスを含む曲げ性能であるため、繊維形状の選定とその混入率は、硬化後の物性を優先して考慮しなければならないと言える。以上を踏まえた上で、本実験から良好と判断された鋼繊維は、インデント、フック-1およびフック-2と言える。これらは繊維強度が高く、

優れた架橋効果を有していることから、高強度コンクリートの靱性性能の改善を図るには適切な繊維であると判断できる。また、比較的少ない混入率で曲げ強度の向上が期待できることから、これらの繊維混入率は1.0～1.5%程度で十分と言える。

本実験結果から、繊維形状を工夫することで混入率の低減が可能となり、十分な補強効果が得られることが判明した。これは、フレッシュ性状および硬化性状から、断面形状には円形状が望ましく、加工形状には適度な塑性変形を伴う繊維が望ましいと言える。さらに、繊維強度に関しては、マトリックス強度に対して十分高い繊維が有効と判断された。また、鋼繊維の機械的特性から、比較的少量混入しなければ曲げ性能の向上が実現できないと判断される繊維の混入率に関しては、フレッシュ状態における作業性や施工性を含めた適用分野の十分な検討が必要と言える。

5. 結論

鋼繊維補強した高強度コンクリートの性能を左右する影響因子として、繊維形状および混入率を取り上げて各性状調査を実施したが、鋼繊維の付着性能を含む硬化性状に関しては、繊維強度の影響も関連していることから、それらも併せて考慮し検討した結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 鋼繊維の付着性能は、繊維形状とそれ自体が負担する引張力に大きく影響しており、繊維強度と付着強度の複合作用によって荷重の増進が決まる。従って、繊維強度の高強度化により、更なる荷重の増進が可能になると言える。
- (2) 鋼繊維補強した高強度コンクリートにおいて、フレッシュ性状に影響する因子は、繊維の断面形状および混入率であると言える。また、曲げ特性に関しては、繊維の加工形状、混入率および引張強度であると言える。
- (3) 鋼繊維補強した高強度コンクリートの曲げ変形性能は、鋼繊維の付着性能と密接な関係があると言える。すなわち、付着試験結果から、曲げ試験での最大荷重以降の挙動が推察でき、曲げタフネスの良否もほぼ推定することが可能である。
- (4) 高強度コンクリートを鋼繊維補強する場合に要求される繊維の特性は、繊維強度がある程度大きく、且つ破断することなく、適度な塑性変形を伴って抵抗する構造を有していることと言える。本実験で使用した鋼繊維の中で良好と判断された繊維は、インデント、フック-1、およびフック-2である。また、これらの繊維形状の補強効果を考慮して最適と判断される混入率は、1.0～1.5%程度であると言える。

参 考 文 献

- 1) 六郷恵哲, 内田裕市, 小柳 治: 各種鋼繊維により補強した高強度コンクリートの破壊性状, 土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集 V-146, 1983.9
- 2) 土木学会編: 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案), コンクリートライブラリー97, 1999.11
- 3) 趙 力采, 小林一輔, 西村次男: 鋼繊維の付着特性と鋼繊維補強コンクリートの曲げ性状との関係について, 土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集 V-64, 1980.9
- 4) 日本コンクリート工学協会編: 繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準, 1984.2
- 5) 真嶋光保, 幸左賢二, 大野定俊: 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版, pp.33-44, 1994.5
- 6) 小林一輔: 繊維補強コンクリート特性と応用一, オーム社, p.91, 1981.6

(原稿受理年月日: 2003 年 4 月 9 日)

Effects of Fiber Shapes and Contents on Steel Fiber Reinforcement in High-Strength Concrete

By Kogo Ushida, Shahid Nasir, Takumi Uehara and Hidetaka Umehara

Concrete Research and Technology, Vol.15, No.2, May 2004

Synopsis This study focused on the properties of high-strength concrete reinforced by steel fiber with different shapes and contents. First, bond tests of steel fibers in high-strength mortar were conducted. Bond behaviors of six types of steel fibers with different shapes were investigated. Then, fresh and hardening properties of steel fiber reinforced high-strength concrete were examined. The effects of shapes and contents of steel fibers to slump, air content, compressive strength, flexural strength and toughness were investigated.

Key words : fiber shape, fiber content, high-strength concrete, bond properties, flexural properties