

[47] 鋼纖維補強コンクリートの曲げ特性に及ぼす鋼纖維の形状寸法 ならびに粗骨材最大寸法の影響

正会員 小林一輔 (東京大学生産技研)

正会員○趙力采 (東京理工専門学校)

正会員 西村次男 (東京大学生産技研)

安室吉彌 (日本大学大学院)

1. はしがき

鋼纖維補強コンクリートの曲げ特性は纖維混入率はもとより、同一纖維混入率でも纖維の配向および分散状態によって支配されるが、その他鋼纖維の形状寸法や表面特性およびコンクリートマトリックス中の粗骨材の最大寸法によっても相当に異なったものとなることが指摘されている。しかも、実際の鋼纖維補強コンクリートにおいては上記の諸要因が相互に影響を及ぼし合っていることが考えられる。これらの諸要因が曲げ特性に及ぼす影響を明らかにすることは極めて重要であるが、いまだに詳細に検討した報告は見当らない。

本研究は表面特性が同一で、直径及び長さの異なるカットワイヤーを用いて、鋼纖維補強コンクリートの曲げ特性に及ぼす鋼纖維の形状寸法を詳細に検討するとともに、さらにコンクリートマトリックスの粗骨材最大寸法を広汎に変化させることによって、曲げ特性に及ぼす粗骨材最大寸法の影響を明らかにしたものである。

2. 実験の概要

本実験に使用した鋼纖維は引抜き鋼線を切断して製造した平滑な表面のストレート状のカットワイヤーであり、直径が 0.25、0.35 および 0.50 mm で、それぞれの直径においてアスペクト比 (ℓ/d) が 4.0、6.0 および 8.0 となるように長さを変化させたものである（表-1 参照）。

鋼纖維補強コンクリートの曲げ特性に及ぼす鋼纖維の形状寸法の影響に関する試験には、水セメント比が 5.0 % で粗骨材最大寸法が 1.5 mm のコンクリートマトリックスに表-1 の鋼纖維を、それぞれ 1.0、1.5 および 2.0 % 混入した計 27 種の鋼纖維補強コンクリートを製造して用いた。

また、鋼纖維補強コンクリートの曲げ特性に及ぼす粗骨材最大寸法の影響に関する試験には、水セメント比が 5.0 % で、表-1 の鋼纖維それについて表-2 に示す最大寸法の粗骨材を用いたコンクリートマトリックスに鋼纖維を 1.5 % 混入した計 28 種の鋼纖維補強コンクリートを製造して用いた。

一方、曲げ特性の評価は上記コンクリートで作成した $10 \times 10 \times 40$ cm 角柱体を用いて材令 2 週で曲げ載荷試験を実施し、それぞれ曲げ強度および曲げ荷重 - たわみ曲線を求めて行った。曲げ載荷試験は容量 30 t のリーレ型万能試験機を用いて 3 等分点 2 点載荷（スパン：30 cm）により行った。

また、曲げ試験後の破壊断面の纖維数を便宜的に載荷方向の梁高さ中央から上部を圧縮域、下部を引張域として、それぞれの纖維本数を測定した。

表-1 鋼纖維の形状寸法

直径 : d (mm)	長さ : ℓ (mm)	名 称	アスペクト比 (ℓ/d)
0.25	10	0.25 × 10	4.0
	15	0.25 × 15	6.0
	20	0.25 × 20	8.0
0.35	14	0.35 × 14	4.0
	21	0.35 × 21	6.0
	38	0.35 × 28	8.0
0.50	20	0.50 × 20	4.0
	30	0.50 × 30	6.0
	40	0.50 × 40	8.0

表-2 鋼纖維の寸法に対して変化させた粗骨材最大寸法

鋼 繊 維	粗 骨 材		鋼 繊 維		粗 骨 材 最大寸法 (mm)
	直 径	長 さ	直 径	長 さ	
0.25	10	5	0.35	28	10
		10			15
		15			30
0.25	15	5	0.50	20	5
		10			10
		15			15
0.25	20	5	0.50	30	10
		10			15
		15			30
0.35	14	5	0.50	40	15
		10			20
		15			40
0.35	21	5			
		10			
		15			
		20			

3. 曲げ特性に及ぼす鋼纖維の形状寸法の影響

3.1 曲げ強度に及ぼす影響

図-1(A)、(B)および(C)はそれぞれ直径(d)が0.25、0.35および0.50mmでそれぞれ長さが異なる纖維を用いた場合の鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度と纖維混入率との関係を示したものである。これらの図より、1)曲げ強度と纖維混入率との関係は用いる鋼纖維の直径又は長さに拘らずほぼ直線関係となる、2)

同一直径の場合、纖維の長さが長いものほど同一纖維混入率における補強効果は大きくなるが、その傾向は纖維混入率が大きくなるほど顕著となることが明らかである。

一方、図-2(A)、(B)および(C)は図-1の結果に基づき、曲げ強度に及ぼす鋼纖維の直径、長さおよびアスペクト比

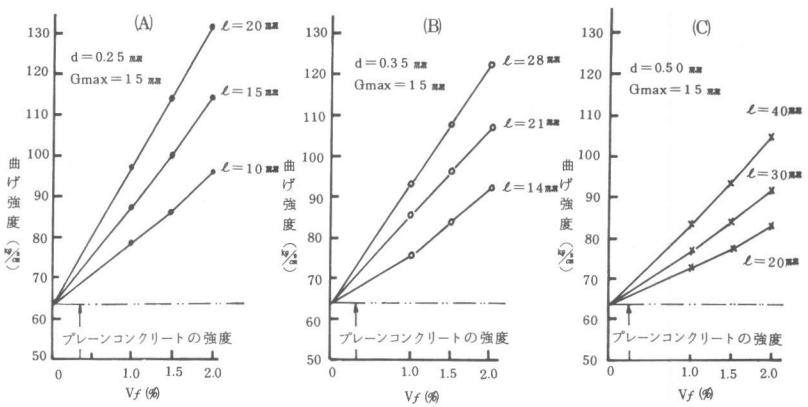


図-1 曲げ強度におよぼす鋼纖維の形状寸法と纖維混入率の影響

の影響をそれぞれ纖維混入率

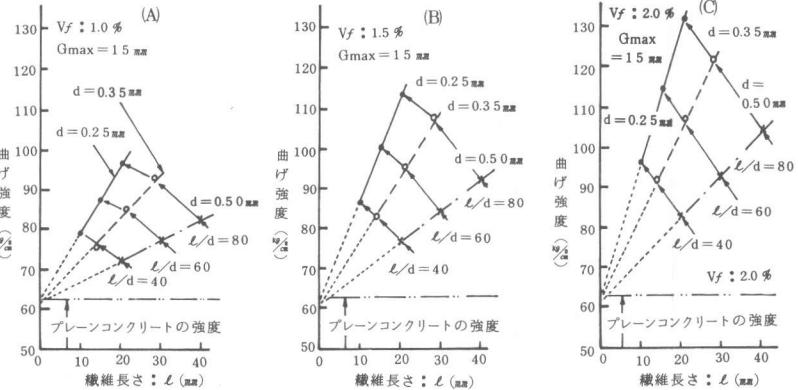


図-2 曲げ強度におよぼす鋼纖維の直径と長さの影響

1.0%、1.5%および2.0%について示したものである。

これらの図より明らかなことは以下のようである。1) 鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度に及ぼす纖維の長さの影響は纖維の長さが大きいものほど補強効果が増大し、その関係はプレーンコンクリートの強度を原点とする直線関係となる、2) 曲げ強度に及ぼす直径の影響は、直径が小さいものほど補強効果が増大し、前述の直線の傾きが大きくなる、3) 同一纖維直径では纖維混入率が大きくなるほど補強効果が増大し、直線の傾きが大となる、4) 曲げ強度に及ぼすアスペクト比の影響は、同一纖維直径であれば、纖維の長さの影響と同様であることなどである。以上の結果は鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度は用いる纖維の長さが極めて短い場合でも多量に用いれば補強効果を生ずることを示唆するとともに同一纖維混入率で、アスペクト比が同一である場合、直径の小さい纖維を用いるほど曲げ強度が増大することを示している。

一方、図-3は図-1を求めた供試体の破断面の纖維本数の平均値を示したものであるが、纖維の直径と混入率が同一であれば破断面の纖維本数は当然のことながら纖維の長さに拘らずほぼ同一となり、さらに同一纖維混入率では用いる纖維の直径が小さいほど纖維本数が増大している。このことより前述の1)の傾向の理由は任意断面のひびわれをブリッジする纖維の長さが用いる纖維の長さが長くなるほど長くなり、マトリックスからの引抜け抵抗力が増大するため、結果的に曲げ強度が増大することによると考えられる。また、3)の傾向は、同一纖維混入率でも、纖維の直径が小さいものほど纖維間隔が小となることと任意断面の纖維本数が増大することによるものと考えられる。すなわち纖維間隔が小となることによるひびわれ進展の拘束効果に加えて、たとえば、 $\phi 0.25 \times 15\text{ mm}$ と $\phi 0.35 \times 21\text{ mm}$ の鋼纖維を2.0%混入し、配向係数 $\beta = 0.41$ とした場合を例にとれば任意

断面の理論纖維本数はそれぞれ 1674 本と 851 本であり、ひびわれをブリッジする纖維長さ ($\ell/4$) を 0.38 及び 0.50 cm とすれば約 2.50 cm の鋼纖維表面積の増大となり、この表面積の増大とその他纖維のひびわれ面からの埋込み長さの減少による平均付着強度の増大を考慮すれば、3) の傾向は説明できると思われる。

3.2 曲げ荷重-変形特性に及ぼす影響

図-4 は曲げ荷重-たわみ性状に及ぼす纖維混入率の影響の 1 例を $\varnothing 0.50 \times 4.0 \text{ mm}$ の纖維を用いた場合について示したものである。当然のことながら纖維混入率が大きいものほど、最大荷重が増大し、その後もたわみの増大に対する耐荷力の低下率が小さくなる。このような性状を図-5 に示す曲げ荷重-たわみ性状における最大荷重とその後の変形能を加味した梅山らのタフネス指数を用いて、曲げタフネスに及ぼす纖維混入率の影響の 1 例を示したものが図-6 である。図より、曲げタフネスと纖維混入率との関係は曲げ強度における場合と同様にはば直線関係と見なしてよく、曲げタフネスは纖維混入率が大きいものほど増大するという一般的な傾向が得られていることがわかる。一方、図-7 は、曲げタフネスに及ぼす鋼纖維の長さと直径の影響を纖維混入率 1.5 %、粗骨材最大寸法 15 mm の場合について示したものである。曲げタフネスに及ぼす鋼纖維の形状寸法の影響として、1) いざれの直径の鋼纖維を用いた場合も、長さが長いものほど曲げタフネスは増大すること、2) 同一鋼纖維長さにおいては、直径が小さいものほど曲げタフネスは増大するが、その増加量は小さいことなどの傾向を示す。

以上のように曲げタフネスは総じて曲げ強度が高いものほど大きくなるといえる。なお、2) の直径の影響に関しては、図-8 に示した曲げ荷重-たわみ性状から明らかなように、鋼纖維直径が小さいほど最大曲げ荷重が大となるが、その後の耐荷力の低下率が大きいことによる。

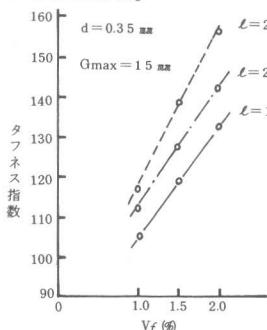


図-6 曲げタフネスと纖維混入率との関係

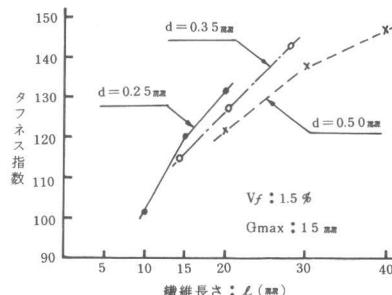


図-7 曲げタフネスにおよぼす鋼纖維の直径と長さの影響

4. 曲げ特性に及ぼす粗骨材最大寸法の影響

4.1 曲げ強度に及ぼす影響

図-9 はコンクリートマトリックスの粗骨材の最大寸法 (G_{\max}) と鋼纖維の長さの両者を変化させた鋼纖維

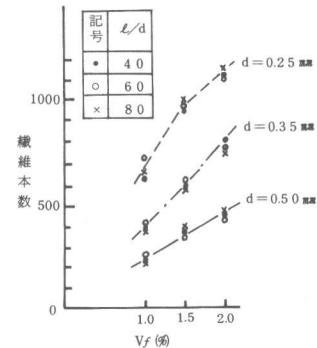


図-3 破断面纖維本数と纖維混入率との関係

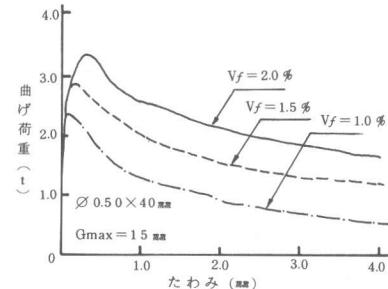


図-4 曲げ荷重-たわみ性状におよぼす纖維混入率の影響

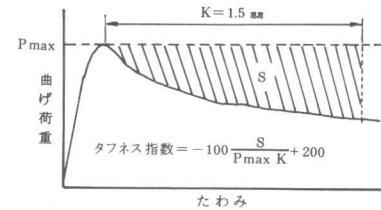


図-5 曲げタフネス指数の定義¹⁾

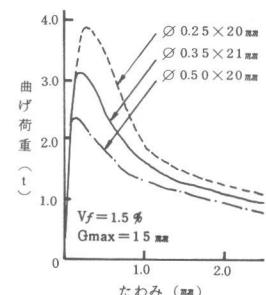


図-8 曲げ荷重-たわみ性状におよぼす鋼纖維の直径の影響

補強コンクリートを用いて、曲げ強度に及ぼす粗骨材最大寸法の影響を示したものである。これらの図より、鋼纖維長さが20mm以下の場合はさほど明確ではないが、長さが20mm以上の鋼纖維を用いた場合いずれも粗骨材最大寸法が鋼纖維長さの約1/2付近で曲げ強度が最大となり、粗骨材最大寸法が鋼纖維の長さと同等以上では曲げ強度が相当に低下することがわかる。この理由としては、岡村が任意断面における鋼纖維の分散状態を測定し指摘したように、鋼纖維の長さを尺度とした場合、粗骨材の最大寸法が大きくなると鋼纖維がコンクリートマトリックス中に一様に分散しなくなり、局所的に鋼纖維の存在しない部分が多く生ずることによるものと思われる。このことは筆者らが求めた粗骨材最大寸法と引張域纖維本数との関係と一致している。例えば、 $\phi 0.50 \times 30\text{ mm}$ の鋼纖維を1.5%混入した場合、粗骨材最大寸法が20mmのとき曲げ強度が最大値となるが、今配向係数が0.41のとき、計算纖維本数157本に対して実纖維本数125本となり、粗骨材最大寸法が40mmのときの実纖維本数は98本である。このことは、少なくとも $G_{max}/\ell = 1/2$ 付近が最も理想的な纖維の分散状態となっていることを示している。

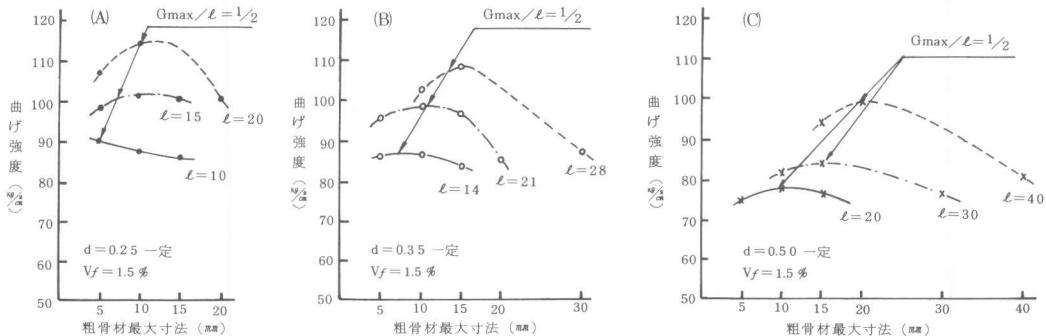


図-9 曲げ強度におよぼす鋼纖維の長さと粗骨材最大寸法との関係の影響

4.2 曲げ荷重-変形特性に及ぼす影響

図-10はタフネス指数に及ぼす粗骨材最大寸法の影響を直径が0.35mmの鋼纖維を1.5%混入した場合について示したものである。曲げタフネス指数も曲げ強度における場合と同様に、粗骨材最大寸法が鋼纖維の長さの1/2付近で最大値を示す。

5. 結論

従来、鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度に影響を与える因子は、纖維混入率とアスペクト比であるとしてそれらの積 ($V_f \cdot \ell/d$) を用いて曲げ強度を推定し

ようとする研究が多い。本研究の結果、曲げ強度は直径が一定であれば $V_f \cdot \ell/d$ と相関が認められるが、用いる纖維の直径によって相当に影響される（図-11参照）のみならず粗骨材最大寸法によっても影響を受けることが明らかとなった。

参考文献 1) 梅山和成：鋼纖維補強コンクリートの引張靱性の評価方法に関する研究（昭和54年度 東京大学修士論文）

2) 岡村雄樹：鋼纖維補強コンクリートの配合設計方法に関する研究（昭和54年度 日本大学学位論文）

3) D.J.Hannant：“Fiber cements and Fiber concretes,” John Wiley & Sons, Ltd. 1978.

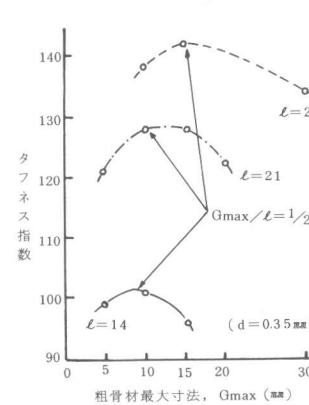


図-10 曲げタフネスにおよぼす粗骨材最大寸法の影響

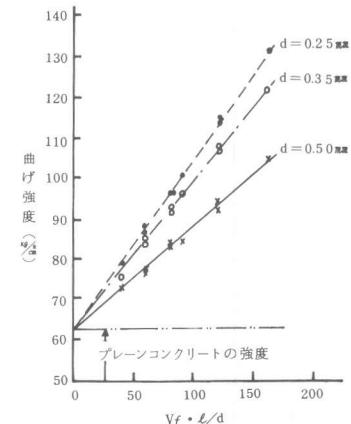


図-11 曲げ強度と $V_f \cdot \ell/d$ との関係