

鋼繊維補強コンクリートの強化則に 関する実験的検討

On the Reinforcement Principles of Steel Fiber Concrete

趙 力 采*・小林 一 輔*

Ryokche CHO and Kazusuke KOBAYASHI

1. は し が き

鋼繊維補強コンクリートの強化則に関しては、繊維間隔説と混合則に基づくものの二つの考え方がある。筆者らは既に鋼繊維補強モルタルの引張強度（またはひびわれ開始応力度）と繊維間隔の平方根の逆数との間に線形関係が成立することを示し、このような複合材料が粒子強化系複合材料と類似の強化機構を有していることを立証し、複合材料学の立場から繊維間隔説の妥当性を示した。¹⁾一方、鋼繊維補強コンクリートの引張及び曲げ強度を混合則を適用して推定しようとする試みもなされている。

本研究は広範囲に形状特性の異なる鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリートの引張及び曲げ強度試験を実施し、その結果を繊維間隔説と混合則の成立条件に照して検討し、それらの強化則の適合性を明らかにしたものである。

2. 実 験 概 要

使用した鋼繊維は表1に示すように広範囲に直径が異なり、さらにそれぞれの直径において長さを変化させたカットワイヤーとせん断ファイバーである。コンクリートは水セメント比が40%から65%までの計5種類とし、いずれの場合も細骨材率を一定(60%)とした。引張試験は中央部断面が(1)4.4×4.4 cmと(2)10×6 cmでそれぞれ長さが4 cmの平行部を持つ2種類の供試体を用いた。曲げ試験は供試体寸法が(3)5×5×35 cmと(4)10×10×40 cmの角柱体を用いて3等分点載荷方法(スパン30 cm)により実施した。なお(1)と(3)の供試体はいずれも最大寸法が7 mmの粗骨材を用いたものであって、それぞれ平行部の相対する面とスパン中央部の引張縁に貼付したワイヤーストレインゲージにより荷重ひずみ曲線を求め、引張及び曲げひびわれ開始応力度(荷重)を求めた。一方、(2)と(4)の供試体はいずれも最大寸法が10 mmの粗骨材を用いたものであって鋼繊維補強コンクリートの引張及び曲げ強度特性の検討に供した。

3. 鋼繊維補強コンクリートの引張強度特性と強化則

3.1 概 要

ここでは、鋼繊維補強コンクリートにおける以上の強化則の適合性をその成立条件における次の二点を検討することによって確かめた。すなわち、その第1点は鋼繊維補強コンクリートの強度と繊維混入率との関係であって、繊維間隔説が成り立つとすれば、繊維間隔式からも明らかのように、それらの関係は非線形となるはずである。一方、構成素材の容積比のみをパラメーターとする混合則が成り立つとすれば、強度と繊維混入率との関係は線形でなければならない。第2点は鋼繊維の直径、長さ及びアスペクト比と強度との関係であって、繊維間隔説が成立するならば、強度が鋼繊維の直径のみに支配され、長さのアスペクト比には影響されないはずであるが、混合則が成立するならば、アスペクト比が同一であれば強度が直径のいかにかわらず等しくならなければならない。

表1 使用した繊維の諸元

種別	アスペクト比 (l/d)	長さ: l (mm)	直径: d (mm)
カ ッ ト ワ イ ヤ ー	5	3	0.60
	11	5	0.45
	23	8	0.35
	30	15	0.50
	52	14	0.27
	30	7.5	0.25
	40	10	0.25
	50	12.5	0.25
	60	15	0.25
80	20	0.25	
せ ん 断 フ ァ イ バ ー	52	0.24×0.24×14	
	59	0.30×0.30×20	
	74	0.30×0.30×25	
	88	0.30×0.30×30	
	35	0.35×0.35×14	
	45	0.35×0.35×18	
	60	0.35×0.35×24	
	70	0.35×0.35×28	
	42	0.44×0.44×21	
60	0.44×0.44×30		
70	0.44×0.44×35		

* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報
 らない。本研究においては主として上記の点を実験的に確かめることにより、二つの強化則の適合性を明らかにしたものである。

3.2 引張強度と繊維混入率との関係の検討

図1はひびわれ開始応力度と繊維混入率との関係を示したものである。この図から、ひびわれ開始応力度は繊維混入率の増加とともに増大するが、その関係は上に凸の曲線となることがわかる。一方、図2は引張強度に及ぼす繊維混入率の影響を各水セメント比すなわちマトリックス強度が異なる場合について示したものである。この図から、1) 引張強度は繊維混入率とともに増大するが、明らかにその関係は直線ではなくマトリックスの強度にかかわらず上に凸の曲線となる。2) 引張強度に及ぼすマトリックスの強度はほぼ加算的に寄与することなどがわかる。図3はモルタルマトリックス中に繊維の配向度と分散度の影響が小さいと考えられる繊維(アスペクト比: 5, 11及び23)を多量に混入した場合の引張強度と繊維混入率との関係を示したものである。この図からも明らかなように、その関係は図2の場合と同様に上に凸の曲線となることがわかる。以上のように鋼繊維補強コンクリートの引張強度(またはひびわれ開始応力度)と繊維混入率との関係が非線形になるという事実は混合則の成立条件に反するものである。引張強度においてはマトリックス自体の強度が鋼繊維による補強分に対して加算的に寄与しているという結果も混合則の成立に疑問をいだかせる。

3.3 引張強度と鋼繊維の長さ、直径及びアスペクト比との関係の検討

図4は繊維混入率を一定(2%)とし、鋼繊維の直径と長さの異なる(すなわちアスペクト比の異なる)せん断ファイバーを用いた場合の引張強度を示したものである。この図から明らかなことは、1) 鋼繊維の直径が一定の場合、引張強度に及ぼす鋼繊維の長さ又はアスペクト比の影響は比較的小さい、2) 鋼繊維の直径が小さくなるほど引張強度が増大することなどである。このことはひびわれ開始応力度においても同様である(図-3)。鋼繊維補強コンクリートの引張強度が鋼繊維の長さまたはアスペクト比にかかわらず、直径の小さい繊維を用いたものほど大きくなるという結果は混合則では予測し得ないものである。

3.4 繊維間隔説の妥当性

図5は図2の結果に基づき、引張強度と繊維間隔(S)の平方根の逆数($1/\sqrt{S}$)との関係を示したものである。この図から引張強度と $1/\sqrt{S}$ の間には一次比例的な関係が存在し、マトリックスの強度が鋼繊維の補強分に対して加算的に寄与していることが明らかである。一方、

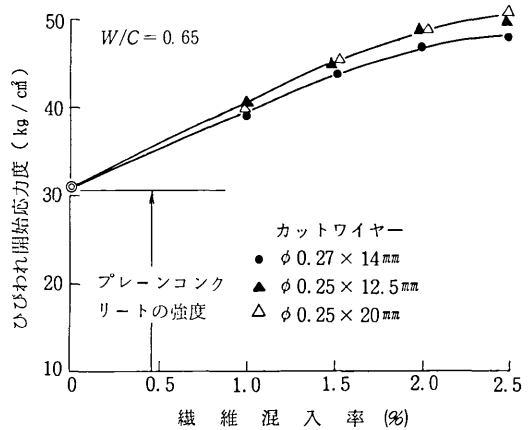


図1 ひびわれ開始応力度と繊維混入率との関係

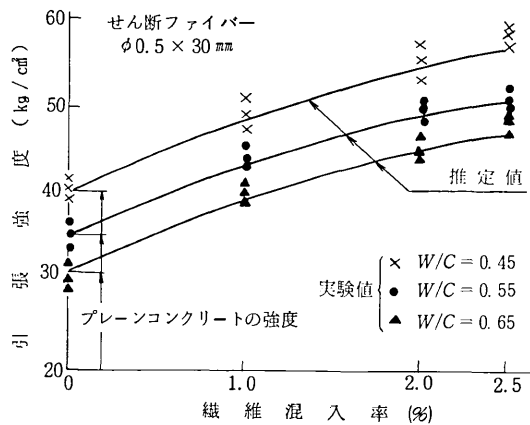


図2 引張強度と繊維混入率との関係

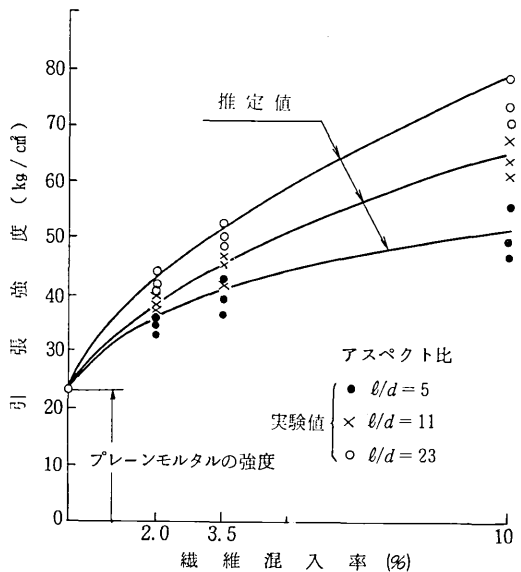


図3 引張強度と繊維混入率との関係

図2及び図3の実線は前報²⁾において提案した次式による推定値を示したものである。

$$\sigma_t = K(1/\sqrt{S} - 1/\sqrt{S_c}) + \sigma_m$$

ここに、

σ_t : 鋼繊維補強コンクリートの引張強度 (kg/cm²)

σ_m : プレーンモルタルまたはコンクリートの引張強度 (kg/cm²)

S : 引張断面における有効繊維間の平均間隔 (cm) で次式によって計算された値

$$S = 5 \sqrt{\frac{\pi}{\beta} \cdot \frac{d}{p}}$$

β : 鋼繊維の配向係数, アスペクト比の影響を考慮した次式によって求める
 $\beta = 0.002 (\ell/d) + 0.4$

d, p : それぞれ鋼繊維の直径 (cm) と容積混入率 (%)

S_c : 鋼繊維が補強効果を生ずる S の上限値,

モルタルの場合: 1.30, コンクリートの場合: 1.00

K : 主として鋼繊維のモルタルまたはコンクリートとの付着強度によって決まる定数, 引張強度を推定する場合

モルタルマトリックス { カットワイヤー: 45
 せん断ファイバー: 57

コンクリートマトリックス { カットワイヤー: 19
 せん断ファイバー: 26

これらの図より明らかなようにマトリックスあるいは鋼繊維の種別が異なる場合でも推定値と実験値が比較的良好に一致することがわかる。以上の結果は単軸引張を受ける鋼繊維補強コンクリートの強化則が繊維強化系複合材料の強化則である混合則ではなく、むしろ粒子強化系複合材料の強化則に近いものであることを示している。このことはとりもなおさず繊維間隔説の妥当性を立証するものである。

4. 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度特性と強化則

図6は曲げ載荷された鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始荷重に及ぼす鋼繊維の種別、長さまたはアスペクト比と繊維混入率の影響を示したものである。図より明らかなことは、1) ひびわれ開始荷重は繊維混入率とともに増大するが、それらの関係はいずれの場合も下に凸の曲線となる、2) ひびわれ開始荷重は鋼繊維の直径が一定であっても長いもの(即ち、アスペクト比が大きいもの)ほど増大することなどである。ひびわれ開始荷重における、1)の結果は混合則に反するものであり、一方、2)の結果は繊維間隔説に反するものである。このことは曲げ載荷された鋼繊維補強コンクリートの強化

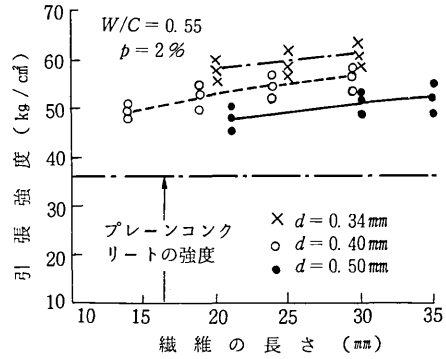


図4 引張強度に及ぼす繊維の長さとの影響

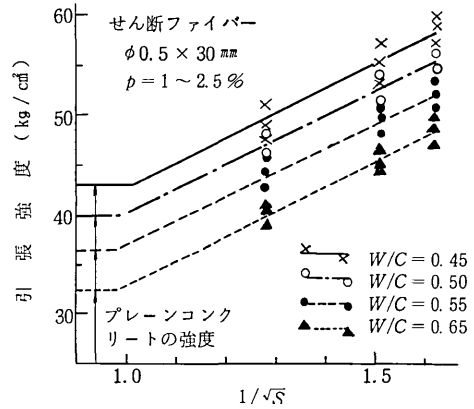


図5 引張強度と $1/\sqrt{S}$ との関係

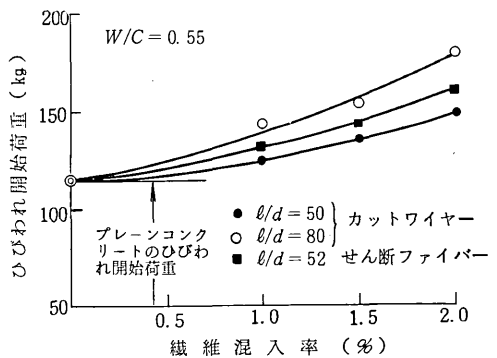


図6 ひびわれ開始荷重に及ぼす繊維混入率の影響

研究速報
 則が単軸引張を受ける場合と異なることを示唆するものである。図7は繊維混入率(2%)と鋼繊維の直径を一定とし、長さの異なる鋼繊維を用いた場合の曲げ強度を示したものである。図から明かなように曲げ強度は鋼繊維の長さあるいはアスペクト比が大きくなるに従って

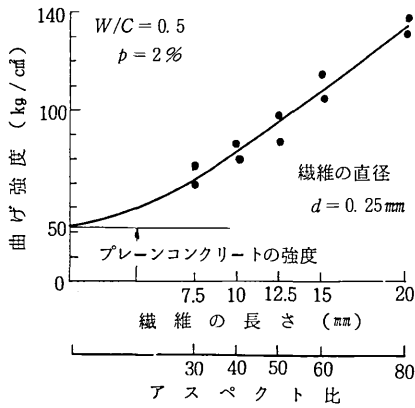


図7 曲げ強度に及ぼす繊維の長さとおアスペクト比の影響

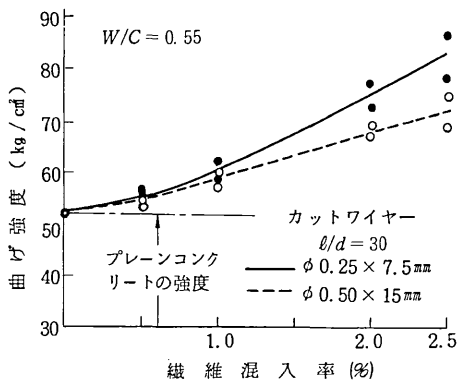


図8 曲げ強度に及ぼす繊維の直径の影響

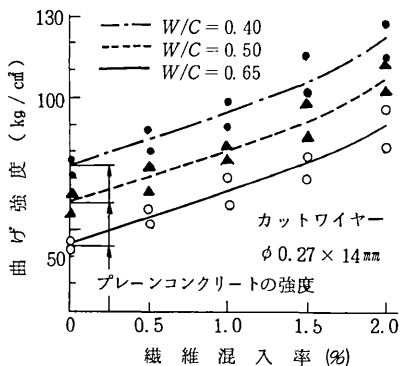


図9 曲げ強度とマトリックス強度との関係

著しく増大することがわかる。このことは明らかに曲げ載荷された鋼繊維補強コンクリートに対しては繊維間隔説が適合しないことを示している。図8はアスペクト比が一定($l/d=30$)で直径の異なる繊維を用いた場合の繊維混入率と曲げ強度の関係を示したものである。図より、1) 曲げ強度も引張強度と同様に直径が小さい鋼繊維を用いた方が大きくなる。2) 曲げ強度と繊維混入率との関係が下に凸の曲線となることなどが明らかである。これらの結果はいずれも混合則の成立条件に反するものである。図9は水セメント比が広範囲に異なるコンクリート中にカットワイヤーをそれぞれ0.5%から2%まで混入した場合の、曲げ強度に及ぼすマトリックスの強度の影響を示したものである。この図から、曲げ強度と繊維混入率との関係が、マトリックスにかかわりなくいずれの場合も非線形となること、また曲げ強度においてもマトリックス自体の強度と鋼繊維による補強分とに分けて考えることができることが明らかである。以上のように曲げ載荷された鋼繊維補強コンクリートに対しては繊維間隔説と混合則のいずれの適用も無理であると考えられる。

5. まとめ

以上の結果を要約すれば以下のようである。

- 1) 鋼繊維補強コンクリートの強化則は引張を受ける場合と曲げを受ける場合とは異なるようである。
- 2) 鋼繊維補強コンクリートの引張強度に関しては、繊維強化系複合材料の強化則である混合則が成立せず、粒子強化系複合材料の強化則と同様な強化則が適用できる。このことはとりもなおさず、繊維間隔説の妥当性を示すものである。
- 3) 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度に関しては、複合材料としての上記のいずれの強化則も成立せず、むしろ2つの材料の機械的組合せによって得られる鉄筋コンクリート部材における力学的釣合いによる強化理論が当てはまる。³⁾
- 4) 鋼繊維補強コンクリートの引張及び曲げ強度に対するマトリックス強度の寄与は加算的になる。

(1977年8月8日受理)

参考文献

- 1) 小林一輔, 趙 力采, 単軸引張を受ける鋼繊維補強コンクリートの強度と変形, 土木学会論文報告集, No 258, 1977.1
- 2) 小林一輔, 趙 力采, 短い鋼繊維によるコンクリートの強化機構, 生産研究, Vol. 28, No 7, 昭和51年7月
- 3) 趙 力采, 小林一輔, 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度, 生産研究, Vol. 29, No 8, 昭和52年8月