

鋼纖維補強コンクリートのひびわれ開始応力度 と強化則について

REINFORCEMENT PRINCIPLES AND FIRST CRACKING STRENGTH
OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

小林一輔*・趙力采**
By Kazusuke KOBAYASHI and Ryokche CHO

1. まえがき

著者らはモルタルをマトリックスとした鋼纖維補強コンクリートについてそのひびわれ開始応力度の求め方を示し、さらに引張強度と纖維の平均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明らかにした¹⁾。

本文ではこの関係がコンクリートをマトリックスとした鋼纖維補強コンクリートにおいても成立すること、鋼纖維補強コンクリートの強化則としては、纖維強化系複合材料としての強化則ではなく、むしろ粒子強化系複合材料としての強化則が適合するという前報の推論を一連の実験によって再確認したものである。本文ではさらに前報で提案したひびわれ開始応力度の求め方が、コンクリートをマトリックスとした場合にも適用できることを確かめるとともに、ひびわれ開始応力度と引張強度との間に一定の関係が存在し、この関係を用いることによって鋼纖維補強コンクリートのひびわれ開始応力度を簡便に求めることができることを示した。

以上より明らかなように、本文は前報を補足し、さらに発展させたものであって、前報で得られた結論を再確認するとともに、その一般性を証明したものである。

2. 実験概要

セメントは早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材は最大寸法が 7 mm の川砂利と 10 mm の碎石を用いた。コンクリートの配合は水セメント比が 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 ($s/a = 60\%$) とした。使用した鋼纖維は表-1 に示すように広範囲に直径と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って、上記のコンクリート中にそ

れぞれ容積百分率で 0.5

% から 2.5% まで混入した。

供試体は中央部断面が $4.4 \times 4.4 \text{ cm}$ と $6 \times 10 \text{ cm}$ でそれぞれ長さが 4 cm の平行部をもつ 2 種類とし、前者は最大寸法が 7 mm、後者は 10 mm の粗骨材を用いたコンクリートで製作した。引張試験は、いずれの場合も材令 2 週で行い、 $4.4 \times 4.4 \text{ cm}$ 断面の供試体は平行部の

表-1 使用した纖維の諸元

種別	アスペクト比 (l/d)	長さ : l (mm)	直径 : d (mm)
カ	30	15	0.50
ツワ	52	14	0.27
トイ	50	12.5	0.25
ヤ	80	20	0.25
		52	$0.24 \times 0.24 \times 14$
		59	$0.30 \times 0.30 \times 20$
せん	74	0.30 × 0.30 × 25	
断	88	0.30 × 0.30 × 30	
フ	35	0.35 × 0.35 × 14	
タ	45	0.35 × 0.35 × 18	
イ	60	0.35 × 0.35 × 24	
バ	70	0.35 × 0.35 × 28	
一	42	$0.44 \times 0.44 \times 21$	
	60	$0.44 \times 0.44 \times 30$	
	70	$0.44 \times 0.44 \times 35$	

相対する面にワイヤストレーンゲージ（ゲージ長 40 mm）を貼付して鋼纖維補強コンクリートの応力ひずみ曲線を求め、ひびわれ開始応力度と引張強度との関係の検討に用いた。一方、 $6 \times 10 \text{ cm}$ 断面の供試体は引張強度に及ぼす鋼纖維に関する諸要因の影響の検討に用いた。なお、試験機は島津製作所製のオートグラフ（容量 5 t）を用い、クロスヘッドの速度を一定（毎分 0.5 mm）として載荷試験を行った。

3. 鋼纖維補強コンクリートの強化則の適用性

(1) 概要

鋼纖維補強コンクリートの諸特性に関しては最近の研究によって多くのことが明らかになっているが、その強化機構についてはまだ不明確な点が多い。鋼纖維補強コンクリートの強化機構を検討するにあたってはこれまで提案してきた考え方を整理するとともに、複合材料的な立場からその適用条件を明らかにする必要がある。

複合材料の破壊過程はその強化機構を検討する上でき

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 東京理工専門学校助教授

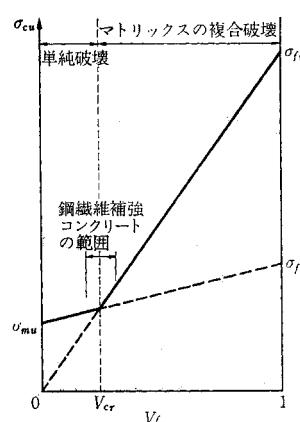


図-1 繊維強化複合材料の引張強度と繊維量との関係

わめて重要であり、破壊形式が異なれば当然のことながら強化則も異なってくる。図-1はモルタルまたはコンクリートのような脆性マトリックスを高弾性で高強度の連続鋼纖維で一方向強化した複合材料に混合則を適用して求めた繊維量と強度との関係を示したものである²⁾。すなわち、繊維量が少ない場合(限界値、 V_{cr} 以下)、マトリックスの1か所に生じたひびわれに帰因する複合体の破壊、すなわち単純破壊を生じる。一方、繊維量が多い場合には、破壊時ひずみに達したマトリックスのひびわれの進行によって、複合体はマトリックス部分が複数のブロックに分割される。この場合、荷重は繊維によって伝達されその後は繊維の破断によって生ずる破壊、いわゆる複合破壊を生じる。この場合、混合則は繊維量の値がきわめて小さい範囲でしか成立しない。一般に鋼纖維補強コンクリートの場合、その実用範囲の繊維量が1~2%であって、その破壊形式は単純破壊から複合破壊に変化する領域となる。したがって、鋼纖維補強コンクリートに対して繊維強化系複合材料の強化則としての混合則の適用性はこの面からも疑わしいが、本文ではこれを実験的に確認しようとしたものである。

一方、モルタルをマトリックスとした場合の鋼纖維補強コンクリートの強化則としては粒子強化系複合材料の強化則と類似の強化則が成立することは前報に示したとおりである。この場合、鋼纖維補強コンクリートの引張強度は式(1)によって求まる。

$$\sigma_{cu} = K(1/\sqrt{S} - 1/\sqrt{S_c}) + \sigma_m \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

σ_{cu} ：鋼纖維補強コンクリートの引張強度

σ_m ：プレーンモルタルまたはコンクリートの引張強度

K ：主として鋼纖維のマトリックスとの付着強度によって決まる定数

S ：鋼纖維の平均間隔

S_c ：鋼纖維が補強効果を生ずる S の上限値

本文ではこれらの点についても、コンクリートをマトリックスとした鋼纖維補強コンクリートによって実験的に再確認を行った。

(2) 各強化則の適用条件

ここでは、鋼纖維補強コンクリートに対する以上の強化則の適合性を明らかにするために、次の二点について検討を行った。その第一点は鋼纖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、粒子強化系複合材料の強化則が成り立つとすれば、繊維間隔式(2)と式(1)との関係からも明らかなように、それらの関係は非線形であり、強度は V_f の4乗根に比例することになる。

$$S = 5\sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \cdot \frac{d}{\sqrt{V_f}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

β ：繊維の配向係数

d ：繊維の直径

V_f ：繊維の容積百分率

一方、混合則が成り立つとすれば、式(3)からも明らかなように、強度と繊維混入率との関係は線形でなければならない。

$$\sigma_{cu} = \sigma_m(1 - V_f) + \beta \cdot \tau \cdot l/d \cdot V_f \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

τ ：繊維とマトリックスとの付着強度

l ：繊維の長さ

第二点は鋼纖維の直径、長さおよびアスペクト比と強度との関係であって、粒子強化系複合材料の強化則が成立するならば、強度が鋼纖維の直径のみに支配され、長さとアスペクト比には影響されないはずである。一方、混合則(式(3))が成立するならば、鋼纖維のアスペクト比が同一の場合、その強度が直径のいかんにかかわらず等しくならねばならない。本文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ようとするものである。

(3) 鋼纖維補強コンクリートの強化則の適合性

a) 引張強度と繊維混入率との関係の検討

図-2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。なお、ひびわれ開始応力度は前報に示したように、単調漸増引張載荷試験による応力とひずみとをそれぞれ片対数グラフの縦軸と横軸(対数軸)にプロットして得られる折点に対応する応力度として求められるものである。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-3は引張強度

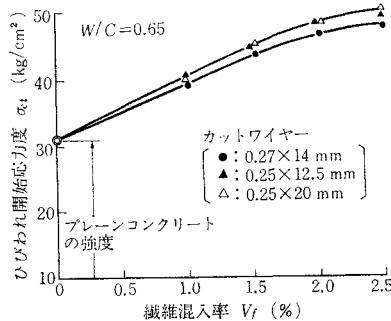


図-2 ひびわれ開始応力度と繊維混入率との関係

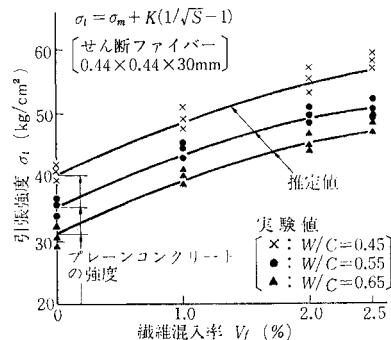


図-3 引張強度と繊維混入率との関係

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強度にかかわりなく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。以上のように鋼纖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に反するものである。

b) 引張強度と鋼纖維の長さ、直径およ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、鋼纖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) 鋼纖維の直径が一定の場合、引張強度に及ぼす鋼纖維の長さまたはアスペクト比の影響は比較的小さい。2) 鋼纖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。引張強度が鋼纖維の長さまたはアスペクト比にかかわりなく、直径の小さい纖維を用いたものほど大きくなるという結果は混合則からは誘導できないのである。

c) 粒子強化系複合材料の強化則の妥当性

図-5は図-3の結果に基づき、引張強度と繊維間隔

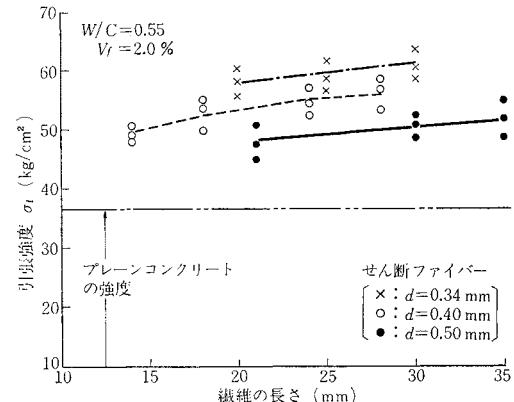
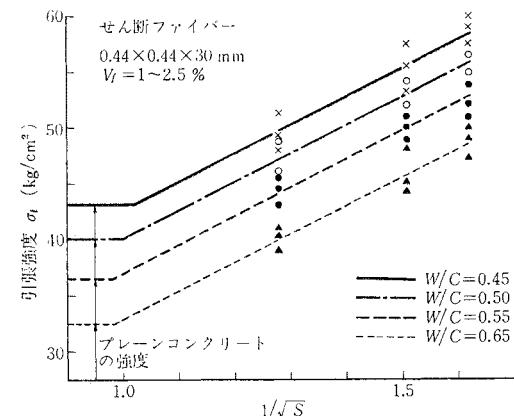


図-4 引張強度に及ぼす繊維の長さと直径の影響

図-5 引張強度と $1/\sqrt{S}$ との関係

(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 $1/\sqrt{S}$ との間には一次比例的な関係、すなわち引張強度が V_f の 4 乗根に比例するという関係が存在し、マトリックスの強度が鋼纖維の補強分に対して加算的に寄与していることがわかる。一方、図-3 の実線は式(1)による推定値を示したものであって、マトリックスの強度が異なる場合でも、推定値と実験値とが比較的よく一致していることがわかる。なお、コンクリートをマトリックスとした場合の单一纖維の引抜き試験によって得られた付着強度 K ならびに図-5に基づいて求めた S_c は下記の値となる。

$$K \text{の値} \begin{cases} \text{カットワイヤーの場合} & : 19 \\ \text{せん断ファイバーの場合} & : 26 \end{cases}$$

$$S_c \text{の値} : 1.00$$

以上の結果はコンクリートをマトリックスとした鋼纖維補強コンクリートにおいても、その強化則は纖維強化系複合材料の強化則ではなく、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。

4. 鋼纖維補強コンクリートのひびわれ開始応力度

図-6は剛性の変化を調べるために、コンクリートをマトリックスとした鋼纖維補強コンクリートの繰返し漸増引張載荷試験を行って求めた繰返し応力ひずみ曲線である。一方、図-7は図-6に基づき各繰り返し載荷における最大応力度とそのときの剛性、全ひずみ、残留ひずみとの関係¹⁾を求めたものである。図-7より明らかなように各繰り返し載荷における最大応力度に対する剛性、残留ひずみおよび全ひずみとの関係は後者を対数目盛でプロットすることにより、明確な折点を有する折れ線によって表わされる。このことは、コンクリートをマトリックスとした場合も、ひびわれ開始応力度、すなわち剛性の急激な低下を生ずる応力度がこの折点として明確にとらえられること示している。さらに、前報と同様に、単調漸増載荷試験によって得られたひずみ値を片対数グラフの対数軸にプロットすることによりひびわれ開始応力度を求めることができる。図-8は本方法によって求めた鋼纖維補強コンクリートのひびわれ開始応力度(σ_{ct})に対する引張強度(σ_t)との比(σ_{ct}/σ_t)と纖維間隔(S)との関係を示したものである。図から明らかなように σ_{ct}/σ_t と S との間には直線関係が成立し、それらの関係はカットワイヤーを用いた場合、式(a)、せん断ファイバーを用いた場合は、式(b)によって表わされる。式(a)および(b)を用いることにより引張強度からひびわれ開始応力度を得ることができる。

5. むすび

本文はコンクリートをマトリックスとした場合の鋼纖維補強コンクリートについて、前報で提案したひびわれ開始応力度の求め方が成立することを確認するとともに、鋼纖維補強コンクリートが纖維強化系複合材料ではなく粒子強化系複合材料とみなすべきであることを示した。

参考文献

- 1) 小林・趙：単軸引張を受ける鋼纖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. 257、1977. 1.

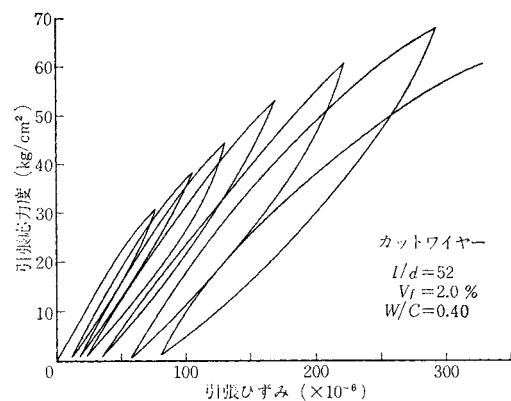


図-6 繰り返し漸増引張応力ひずみ曲線

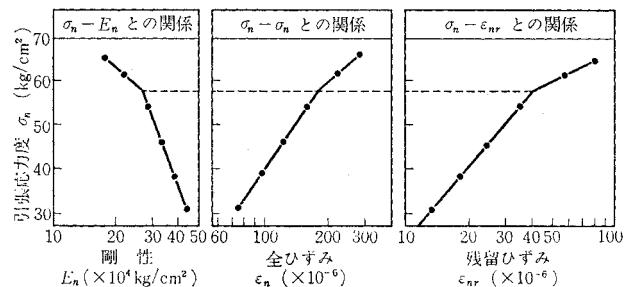


図-7 繰り返し漸増引張応力ひずみ曲線から求めた剛性、ひずみならびに残留ひずみの変化

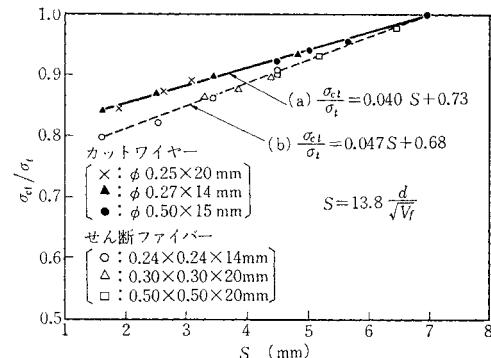


図-8 σ_{ct}/σ_t と纖維間隔との関係

- 2) J. Aveston, G.A. Cooper and A. Kelly : The properties of fibre composites, Conference Proceedings National Physical Laboratory, 4 November 1971.

(1978.5.15・受付)