

UDC 666.983.017
539.413.015.1

鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度

Flexural Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete

趙 力 采*・小 林 一 輔*

Ryokche CHO and Kazusuke KOBAYASHI

1. は し が き

本報告は曲げ荷重下における鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生とその進展を定量的に捉えることにより、鋼繊維補強コンクリートの破壊過程を詳細に検討するとともに、ひびわれ開始荷重及び最大荷重の推定式を提案したものである。

2. 鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-変形特性

曲げ荷重による鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生とその進展を定量的に把握するために、梁供試体のスパン中央部の引張縁、高さ中央と圧縮縁に貼布したストレインゲージによるひずみの測定とスパン中央部の供試体下面に固定した標点距離が10cmのπゲージによるひびわれ幅の測定を行った。(図-1参照)。なお曲げ試験は

を有していることがわかる。各荷重段階で除荷した供試体の顕微鏡観察結果によれば、変曲点(A₁とA₂)における荷重段階では梁の全幅にわたる0.005mm程度の明確なひびわれが認められ、梁の高さ中央のひずみがA₁点のひずみ値に達したA₃点に対応する荷重段階では微細なひびわれがほぼ高さ中央まで達していることが認められた。一方、プレーンコンクリートの場合はI'とII'から明らかなように供試体下面にひびわれを生じた後も若干の荷重の増加を伴い最大荷重に達し、ひびわれが梁の高さ中央に達した時点では耐荷力が低下していることがわかる。筆者らは引張縁における荷重-ひずみ曲線上の変曲点に対応する荷重を曲げを受ける鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始荷重とし、これに対応する引張縁中央部の引張ひずみ値をその伸び能力と定義した。一方、梁の高さ中央におけるひずみが変曲点のひずみ値(伸び能力)に達した時の荷重を梁の高さ中央までひびわれが到達した荷重(以後、到達荷重とする)とした。図-2はアスペクト比がほぼ50のカットワイヤー(φ0.25×12.5mm)とせん断ファイバー(0.24×0.24×14mm)をそれぞれ

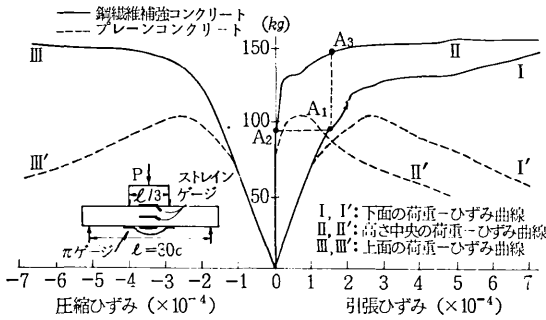


図-1 曲げ試験による荷重-ひずみ曲線

容量5tの島津オートグラフを使用し、クロスヘッド速度を毎分0.5mmとして三等分点載荷方法(スパン30cm)により載荷した。

図-1はプレーンコンクリート(破線:I'~III')とアスペクト比が30のカットワイヤーを2%混入した鋼繊維補強コンクリート(実線:I~III)における曲げ荷重-ひずみ曲線を示したものであって、曲線IとI'、曲線IIとII'およびIIIとIII'はそれぞれ供試体下面、高さ中央と上面におけるものである。図から明らかなように曲線IとIIのいずれの場合も変曲点(A₁とA₂)

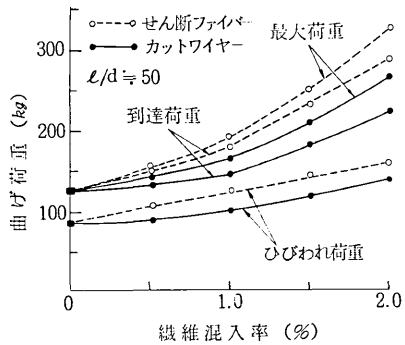


図-2 ひびわれ荷重、到達荷重と最大荷重に及ぼす繊維混入率の影響

れ0.5~2.0%混入した鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始荷重、到達荷重ならびに最大荷重との関係を示したものである。この図から明らかなことは、1) ひびわれ開始荷重、到達荷重および最大荷重のいずれも繊維混入率が増すにつれて増大し、またこれらの値はカットワイヤーに比しせん断ファイバーを用いたものが高くなること、2) いずれの繊維を用いた場合でも微細なひびわ

*東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

れが梁の高さ中央に達した後も荷重の増加に抵抗するが、その到達荷重との差は繊維混入率が増すにつれて大きくなることなどである。図-3は繊維の種類、アスペクト比及び繊維混入率を変化させた鋼繊維補強コンクリート

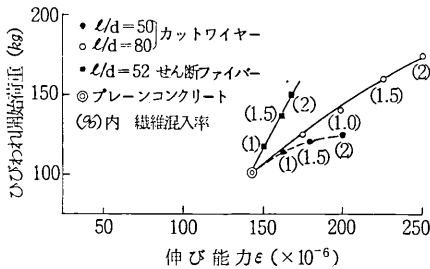


図-3 伸び能力とひびわれ開始荷重との関係

の曲げ引張縁の伸び能力とひびわれ開始荷重との関係を示したものである。図より、1) 伸び能力は繊維混入率やアスペクト比が増すと大きくなるが、繊維混入率が2%でプレーンコンクリートの約2倍程度であること、2) 同一ひびわれ開始荷重のときの伸び能力はせん断ファイバーよりカットワイヤーを用いたものが大きいこと、3) 同一直径でも繊維が長くなるほどひびわれ開始荷重と伸び能力が増大することがわかる。図-4はアスペクト比の異なるせん断ファイバーをそれぞれ一定量(2.0%)

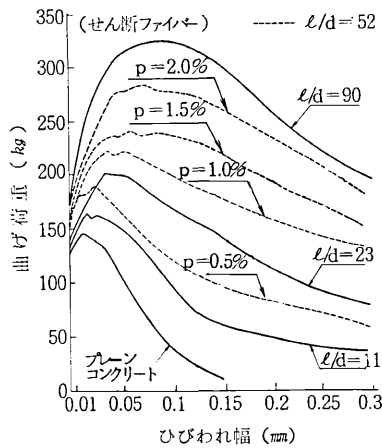
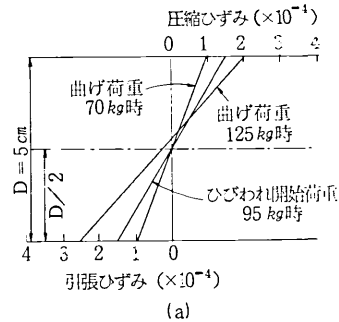


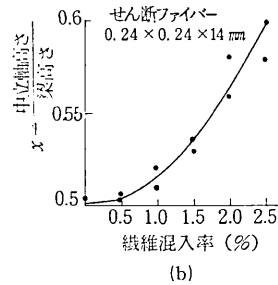
図-4 せん断ファイバーを用いた鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重によるひびわれ幅の変化

混入したものと、アスペクト比が52のせん断ファイバーの繊維混入率を変化させた鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重による引張縁のひびわれ幅の変化を示したものである。これによるとプレーンコンクリートは最大荷重時に0.02mm程度のひびわれを生じ、その後はその拡大と共に急速に耐荷力を減ずるのに対して、鋼繊維補強コンクリートは繊維のアスペクト比あるいは繊維混入率が大きくなるに従って最大荷重とその時のひびわれ幅がともに増大す

ることがわかる。一方、図-5aは図-1より求めた鋼繊維補強コンクリート梁の中立軸の位置を示したものである。図から明らかなように鋼繊維補強コンクリートの中立軸は梁の高さ中央であり、ひびわれ開始荷重まで移



(a)



(b)

図-5 鋼繊維補強コンクリート梁の中立軸の変化

動しないことがわかる。図-5(b)は繊維のアスペクト比が52のせん断ファイバーの混入率を変化させた場合の最大荷重時の中立軸の移動量(梁高さに対する中立軸の高さの比)と繊維混入率との関係を示したものである。図より、中立軸の位置がプレーンコンクリートにおける梁高さの1/2から繊維混入率が2.5%の時の梁高さの3/5まで、曲線的に増大することがわかる。

以上のように鋼繊維補強コンクリートが曲げ荷重された場合、引張縁に発生した微細なひびわれが、プレーンコンクリートにおいては既に耐荷力を減じている梁の高さ中央に達した後も荷重の増加に抵抗するという事実は、中立軸より下の繊維がまだ十分なマトリックスとの付着強度を有していることを示している。このことは、中立軸以下の引張断面における引張力をコンクリートと繊維が分担して受け持つと仮定することの妥当性を示すものである。従って、著者らは曲げ荷重された鋼繊維補強コンクリートの最大荷重はプレーンコンクリートの曲げ荷重に中立軸より下の全繊維のマトリックスとの付着強度によってもたらされる引張力を加算することによって求まるとした。

3. 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度推定式

研究速報

3.1 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始荷重

(i) ひびわれ開始荷重時における引張力と圧縮力の作用状態

鋼繊維コンクリート梁のひびわれは梁の引張縁近傍の鋼繊維が持つ引張力(T_r)に達した時に生ずると仮定する。図6(a, b, c)は仮定した梁断面における鋼繊維の配置、ひずみ分布及び繊維が分担する引張力と圧縮力の作用状態を示したものである。すなわち、鋼繊維補強コンクリートの中立軸はひびわれ開始荷重まで移動しないことから、梁の高さ中央($D/2$)を中立軸とするひずみの直線

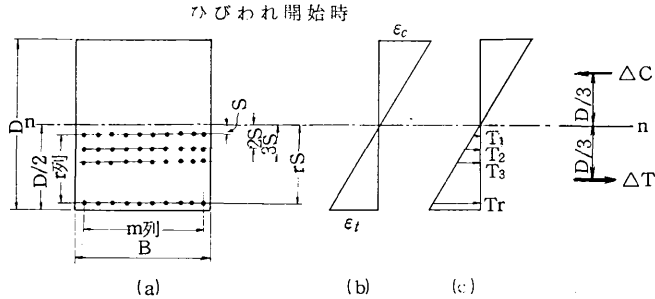


図-6 梁断面の鋼繊維配置のモデル、ひずみの分布と繊維が分担する引張力と圧縮力の作用状態

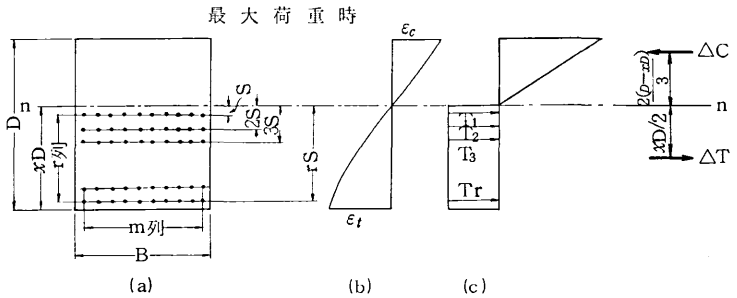


図-7 仮定した梁断面のひずみ分布と繊維が分担する引張力と圧縮力の作用状態

分布状態(図6.b)とし、繊維が分担する引張力と圧縮力の作用状態は図6.cのように仮定する。今、繊維をP%混入した鋼繊維補強コンクリート中の鋼繊維が基盤目状に配列しているとすれば、繊維間隔の平均間隔S(cm)は(1)式によって求まる。

$$S = 5\sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \cdot \frac{d}{\sqrt{p}} \quad (1)$$

ここに 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 : 鋼繊維の直径 (cm)
 p : 鋼繊維の容積混入率 (%)

従って、梁の中立軸($D/2$)より下及び梁幅(B)方向の鋼繊維の本数は近似的にそれぞれ、 $r = D/2S$ 、 $m = B/S$ であって整数とし、中立軸より最遠の繊維までの距離は $rS = D/2$ とする。

(ii) ひびわれ開始荷重の推定式

鋼繊維補強コンクリート梁のひびわれ開始荷重(P_o kg)時の抵抗モーメント M_o はプレーンコンクリート梁のひびわれ開始荷重(P_{mo} kg)時のモーメント M_{mo} に鋼繊維の抵抗モーメント M_{fo} を加算した次式で得られる。

$$M_o = M_{mo} + M_{fo}$$

ここで、三等分点載荷方法(スパンL cm)によって曲げ載荷した場合、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始荷重は(2)式で与えられる。

$$P_o = P_{mo} + \frac{6}{L} M_{fo} \quad (2)$$

また、引張力と圧縮力の増分をそれぞれ ΔT と ΔC とすれば、

$$M_{fo} = \frac{D}{3} \cdot \Delta C + \frac{D}{3} \cdot \Delta T = 2\left(\frac{D}{3} \cdot \Delta T\right)$$

鋼繊維による抵抗モーメント M_{fo} は3.1(i)の仮定により(3)式で示される。

$$\begin{aligned} M_{fo} &= 2m(T_1 S + T_2 \cdot 2S + \dots + T_r \cdot rS) \\ &= 2m \frac{T_r}{rS} \cdot S^2 \sum_{k=1}^r k^2 \\ &= 2 \cdot \frac{B}{S} \cdot \frac{T_r}{D/2} \cdot S^2 \sum_{k=1}^{D/2S} k^2 \\ &= 2 \cdot \frac{B}{S} \cdot \frac{T_r}{D/2} \cdot \frac{S^2}{6} \cdot \frac{D}{2S} \left(\frac{D}{2S} + 1\right) \left(\frac{D}{S} + 1\right) \\ &= \frac{B}{3} \cdot T_r \cdot \left(\frac{D}{2S} + 1\right) \left(\frac{D}{S} + 1\right) \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、中立軸より最遠の繊維の引張力 T_r は(4)式で示される。

$$T_r = \tau \cdot \pi \cdot d \cdot \ell / 4$$

τ : 鋼繊維のコンクリートとの付着強度(kg/cm²)

$\ell/4$: 破断面における鋼繊維の平均付着長(cm)

よって、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始荷重は(2)式、(3)式及び(4)式から次式によって求まる。

$$P_o = P_{mo} + \frac{B}{L} \cdot \tau \cdot \pi \cdot d \cdot \frac{\ell}{2} \left(\frac{D}{2S} + 1\right) \left(\frac{D}{S} + 1\right)$$

3.2 鋼繊維補強コンクリートの最大荷重

(i) 最大荷重時の引張力と圧縮力の作用状態

鋼繊維補強コンクリートの最大荷重は中立軸より下の鋼繊維はすべて付着強度 (τ) で与えられる引張力 Tr に達しているとする。図7 (a, b, c) は中立軸が引張縁から xD の距離まで移動した梁断面における鋼繊維の配置、ひずみ分布及び繊維が分担する引張力と圧縮力の作用状態の仮定を示したものである。すなわち、中立軸高さが xD のひずみの曲線分布状態 (図7・b) とし、引張縁より中立軸までの引張力の短形分布状態と仮定した (図7・c)。なお x の値は繊維混入率 (P) を考慮した実験式 (図5・b 参照) $x = 0.016P^2 + 0.5$ で求める。

(ii) 最大荷重の推定式

鋼繊維補強コンクリート梁の最大荷重 (P kg) 時の抵抗モーメント M はプレーンコンクリート梁の最大荷重 (P_m kg) 時の抵抗モーメント M_m に鋼繊維の抵抗モーメント M_f を加算した次式で得られるとする。

$$M = M_m + M_f$$

三等分点載荷方法によって曲げ載荷した場合、鋼繊維補強コンクリートの最大荷重は(5)式で与えられる。

$$P = P_m + \frac{6}{L} M_f \tag{5}$$

鋼繊維による抵抗モーメント M_f は3.1(i), (4)式及び $M_f = K \left(\frac{xD}{2} \Delta T\right)$ であるが、近似的に $K \approx 2$ として

$$M_f = 2m \cdot Tr \cdot S \sum_{k=1}^{xD/S} k$$

$$= 2 \cdot \frac{B}{S} \cdot \tau \cdot \pi \cdot d \cdot \frac{\ell}{4} \cdot \frac{xD}{2} \left(\frac{xD}{S} + 1\right) \tag{6}$$

よって、鋼繊維補強コンクリート梁の最大荷重は(4)及び(6)式より次式によって求めることができる。

$$P = P_m + \frac{3}{2} \cdot \frac{B}{L} \cdot \tau \cdot d \cdot \ell \cdot \frac{xD}{S} \left(\frac{xD}{S} + 1\right)$$

3.3 推定式と実験値との比較

鋼繊維の付着強度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の最小断面部分 (ここで供試体は2分されている) を横切って引張応力方向に鋼繊維を配置した供試体を用いて行った結果に基づき、カットワイヤーの場合で $\tau = 25 \text{ kg/cm}^2$ 、せん断ファイバーの場合で $\tau = 30 \text{ kg/cm}^2$ とする。図8は $\phi 0.25 \times 12.5 \text{ mm}$ と $\phi 0.25 \times 20 \text{ mm}$ のカットワイヤーを用いた鋼繊維補強コンクリート梁 ($5 \times 5 \times 35 \text{ cm}$) を三等分点載荷方法 ($L = 30 \text{ cm}$) により曲げ載荷した場合の最大荷重、ひびわれ開始荷重と繊維混入率との関係を示したものである。図中の点線と実線はそれぞれひびわれ開始荷重と最大荷重の推定値であり、実験値とよく適合している。図9及び10はそれぞれ直径が一定 ($d = 0.5 \text{ mm}$) で長さ (ℓ) を変化したカットワイヤーと換算直径が 0.5 mm で長さを変化したせん断フ

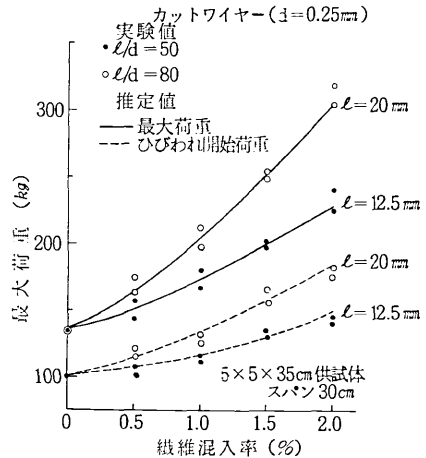


図-8 実験値と推定値の比較

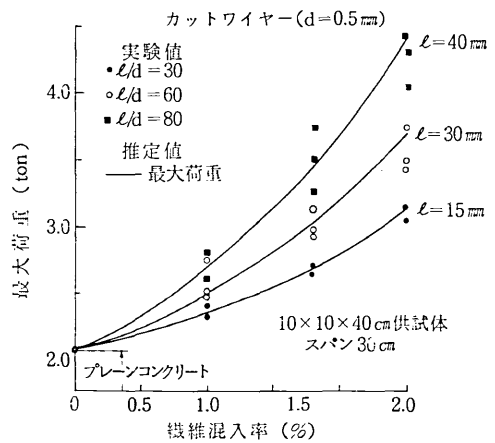


図-9 実験値と推定値との比較

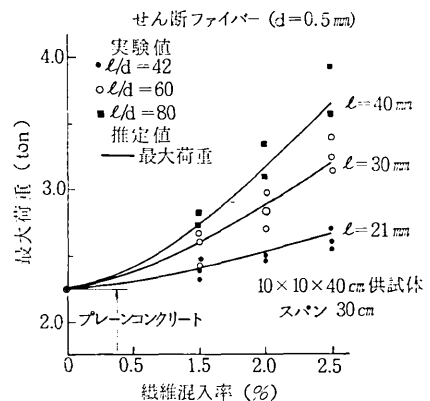


図-10 実験値と推定値との比較

ィバーを用いた $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の梁供試体による最大荷重と繊維混入率との関係を示したものであって、梁の断面あるいは繊維の種別が異なる場合でも実験値と推定値 (実線) がよく一致することが確かめられた。

(1977年5月25日受理)