コンクリート強度が補強用繊維の 付着特性におよぼす影響*

董 賀 祥¹ 大久保 誠 介² 福 井 勝 則³

Influence of Concrete Strength on the Bond Characteristics of Reinforcing Fibers

by Hexiang DONG^a, Seisuke OKUBO^b and Katsunori FUKUI^{b*}

a. Osaka branch, Shinko Building-materials Industry, 46, Marushima, Amagasaki, Hyogo
660-0086, Japan

b. Department of Systems Innovation, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
113-8656, Japan (*Corresponding author E-mail: fukui@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

Bond characteristics considering the effects of concrete strength were investigated by pullout tests. Four polyolefin (PO) fibers were evaluated together with a steel fiber and a polyvinyl alcohol (PVA) fiber. Bond strength or the maximum pullout resistance of each fiber was found to increase with the increase of concrete strength. After careful examination of the experimental data, an experimental equation was proposed stating that the pullout resistance is proportional to 0.785 th powers of the concrete uniaxial-compressive strength. In this study, bending tests of fiber reinforced concrete were also carried out. The results of the bending test were similar to the pullout test; bending strength (modulus of rupture in bending) increased with the increase of concrete strength at similar rate with that of bond strength.

KEY WORDS: Concrete, Steel Fiber, Polyolefin Fiber, Pullout Test, Bending Test

1. は じ め に

繊維補強コンクリートは様々な用途に使われるようになってきており、それに伴って従来の鋼繊維のみならず各種の合成繊維が開発され、使用されるようになってきた。これまでに繊維補強コンクリートに関する研究が熱心に行われてきたが、①斜めに埋込まれた繊維の付着試験(引抜試験)、②コンクリート強度を何段階にも変えた付着試験、は高度の技術を要するためかほとんどおこなわれていない。そこで著者らは、①斜めに埋込まれた繊維の付着試験を実施して、既報¹⁾でその結果を発表した。本稿では、鋼繊維と合成繊維を使用して、②コンクリート強度を5段階に変えた付着試験結果を報告する。また、実際の構造物には曲げ応力に加わる場合が多いので、付着試験結果に合わせてコンクリート強度を5段階に変えた4点曲げ試験も実施したので、その結果も合わせて報告する。

コンクリートの強度が高いほど、繊維の引抜に対する抵抗力が強くなり、高い補強効果が期待できることは容易に想像できるが、これまでの研究ではコンクリート強度を変えて繊維の付着特性を検討したものはほとんど見当たらない。理由の一つは、ある特定の施工箇所を念頭においた研究(ケース・スタディ)が多いため

であろう²⁾。次に考えられる理由は、コンクリート強度を何段階かに変化させ、他の条件は可能な限り一定に保った試験は、細心の注意を必要とするうえに、多くの時間と手間を要するためと推測する。しかしながら、鋼繊維と合成繊維に対するもっとも重要なデータの一つであると著者らは考えて、このコンクリート強度を変えた試験を実施することにした。

本研究においては、水セメント比を調整して、コンクリートの一軸圧縮強度を20～60 MPaの範囲で変えた。現場で使用されるコンクリートの多くはこの強度範囲に入るものといえる。よって、もしこの強度範囲でのコンクリート強度と、繊維の付着特性の関係がわかれば、過去の研究で1種類のコンクリートで得たデータをもとにして、強度の異なるコンクリートでの付着特性を推定できることになる。さらに、繊維長さの影響についても一定の見解を示したので、本研究で提案する実験式は、既存のデータを活用する有効な手段となる可能性がある。

既報¹⁾にならって、繊維による相違を把握するために、鋼繊維、ポリオレフィン繊維、ビニロン繊維について検討した。繊維材料としては、この他にも各種あるが、使用量の大部分は取りあげた3種類が占めているといえよう。この意味でも、本研究の成果は、実際の現場で広く応用される可能性がある。

2. 試 験 方 法

2・1 使用した繊維

本研究では、既報¹⁾と同様にポリオレフィン繊維(PO-1～4と略称する)、ビニロン繊維(PVA)および鋼繊維(SF)の6種類の繊維を用いた。その諸元をTable 1に示す。PO-1とPO-2は、ポリ

*2010年11月4日受付 2011年3月16日受理

1. 工修 神鋼建材工業株式会社 大阪支店

2. 普通会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 システム創成学専攻

3. 普通会員 工博 東京大学准教授 工学系研究科 システム創成学専攻

[著者連絡先] FAX: 03-5841-7035 (東大・システム創成)

E-mail: fukui@sys.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: コンクリート, 鋼繊維, ポリオレフィン繊維, 引抜試験, 曲げ試験

Table 1 Specifications of the fibers.

Fiber No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Density (g/cm ³)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Section area (mm ²)
PO-1	540	9.5	0.92	40	1.40	0.11	0.154
PO-2	540	9.5	0.92	48	1.40	0.19	0.266
PO-3	440	9.8	0.91	48	1.00	0.50	0.500
PO-4	440	9.8	0.91	48	1.00	0.50	0.500
PVA	880	29.4	1.30	40	0.67	0.51	0.342
SF*	1000	200	7.85	47	0.80	0.80	0.503

* SF is the steel fiber of a circular section with a diameter of 0.80 mm.

Table 2 Concrete mixture ratios for bond strength test.

Compressive strength (MPa)	W/C* (%)	C:S**	Cement type	Sand type	Fiber type
58.1	35.0				
46.5	41.5				
35.4	50.0	1:1.7	Normal***	Standard****	6 types
27.1	56.5				
21.6	62.8				

* Water cement (weight) ratio

** Cement sand (weight) ratio

*** Normal portland cement

**** Standard sand according to GB 178-77 (GB: China state standard)

Density = 2.60 g/cm³ & Fineness module = 2.30

プロピレンとポリエチレンを一定の比率で混合したものである。使用するポリプロピレンの引張強度がやや低かったために、引張強度を高める目的で少量のポリエチレンを加えた繊維である。両者の断面は矩形であり、PO-1の方が幅広で厚みが薄く撓み易い。PO-3とPO-4は、表面に凹凸加工を施したポリプロピレン繊維であり、その断面は矩形で、両者の幅、厚み、繊維長は同じである。両者の違いは、PO-3が直線状であるのに対して、PO-4は波状に曲がりくねっていることである。PVAは矩形断面の繊維を、鋼繊維は円形断面で両端フック付き繊維をそれぞれ使用した。なお、PO-1とPO-2は、比較的表面が柔らかいので、コンクリートの練混過程において骨材と擦れあって表面粗さが増す³⁾ので、予めコンクリートに混入し練混を行った繊維を試験で使用した。

2・2 付着試験

付着試験に使用したコンクリートの配合をTable 2に示す。Fig. 1に示すように、供試体中央部の断面寸法は24×26 mmとした。Fig. 2に示すように、所定の埋込長さ15 mmまで繊維をまっすぐに差し込み、埋込長さと同位置を調整した後に、接着剤で仕切り板(separator)に固定した。なお、供試体1個あたりに埋込んだ繊維は、試行錯誤の後に5本とした。これ以上の本数を埋込

Fig.1 Schematic illustration of test piece for bond strength test.

Fig.2 Five fibers embedded through a separator (plastic plate).

むと、試験時に相互干渉が生じることがあったためである。

付着試験(引抜試験)は電子万能試験機を用いて、JCI-SF8”繊維の付着試験方法”⁴⁾に準じて変位速度0.5 mm/minで、同一条件で3本の試験を行った。試験中は、引抜荷重と変位(繊維の引抜量)を毎秒8回の頻度で計算機に読み込んだ。付着試験の結果より、繊維の付着応力(せん断応力) τ [MPa]を次式より計算した。

$$\tau = \frac{F}{nS_e} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F [N]は引抜荷重、 n は繊維本数、 S_e は繊維1本当たりの埋込んだ部分の表面積[mm²]である。なお、 F がピーク値のときの τ は付着強度 τ_p となる。

引抜荷重はピーク値をとった後も一気に低下せず、徐々に低下していく。これを評価するために、所定変位に達するまでの平均引抜荷重 F_m [N]を計算することにした。なお、所定変位はJCI-SF8”繊維の付着試験方法”に準じて2.5 mmとした。この平均引抜荷重に、単位断面あたりの繊維本数をかければ、繊維補強効果に基づく応力 σ_f (繊維の補強強度:Fiber reinforcement[MPa])が算出できる⁵⁾。

$$\sigma_f = F_m \times \left(\frac{PV}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P は配向係数[無次元]、 V は体積繊維混入率[無次元]、 A は繊維の断面面積[mm²]である。

2・3 曲げ試験

供試体はJSCE-F-552”鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げ試験用供試体の作り方”⁶⁾に準じて製作した。コンクリートの使用材料および配合をTable 3, 4に示すが、これはトンネル覆工コンクリート⁷⁾で用いられる配合を参考にして決めた。繊維の長さが40 mm以上であったために、供試体の寸法は150×150×530 mmを選択し、コンクリートの打込みは一層ずつ上下二層に分けた。各配合に対して4本ずつの供試体を打込み、材齢1日で脱枠し、その後28日まで20℃で水中養生した。

4点曲げ試験はJCI-SF4”繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法”⁸⁾に従って、同一条件で4本ずつ試験を実施した。最大荷重までは、JIS A 1106”コンクリートの曲げ強度試験”に準じて載荷速度450±300 N/sで載荷した。亀裂が発生した後は、急激な破断を避けるために、中央点たわみ速度を0.5±0.2 μm/sの範囲に保って試験した。データの計測はデータロガーを用いて1 sごとにデータを取込み、はり中央点たわみが4～5 mmとなるまで試験を実施した。中央点たわみが3 mm(スパン $l=450$ mmの1/150)となるまでの平均荷重 W_m [N]を用いて、 σ_m [MPa]を次式により求めた。

Table 3 Material items of concrete for four point bending test.

Material	Grade
Cement	Normal portland cement
River sand	Density = 2.58 g/cm ³ , Fineness module = 2.79
Crushed stone	Density = 2.70 g/cm ³ , Aggregate maximum size = 20mm
Superplasticizer	Polycarboxinate acid

Table 4 Concrete mixture ratios for four point bending test.

Compressive strength (MPa)	Water cement ratio (%)	Unit weight (kN/m ³)			
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
57.7	35.0	17.2	49.0	86.5	74.1
46.2	41.5	17.2	42.9	89.2	76.3
35.0	50.0	17.2	34.3	89.7	83.2
26.2	56.5	17.2	31.2	90.9	84.5
20.7	62.8	17.8	28.4	89.6	86.5

$$\sigma_m = \frac{W_m \times l}{bh^2} \quad (3)$$

ここで、 b は供試体の幅[mm]、 h は高さ[mm]である。 σ_m は繊維効果の度合いを示す指標の一つと考えられており、曲げタフネス係数と呼ばれてきた。しかしながら、 σ_m の解釈については必ずしも明瞭になっているとはいえない。そこで、著者らの考え方を、この機会に披露しておくことにする。

亀裂がはり断面を通して入っているものとする。この亀裂部分に働く繊維補強に起因する応力は一定値 σ'_{fc} [MPa]をとると仮定する。曲げモーメントを M [N mm]とすれば次式がなりたつ。

$$M = b \int_0^h x \sigma'_{fc} dx = \frac{bh^2 \sigma'_{fc}}{2} \quad (4)$$

4点曲げ試験の場合には、 $M = Wl/6 = (\text{荷重}) \times (\text{スパン})/6$ となるので、これを上式に代入して整理すれば次式を得る。

$$\sigma'_{fc} = \frac{W \times l}{3bh^2} \quad (5)$$

式(5)中の荷重として平均荷重 W_m を代入すれば、左辺は試験中における σ'_{fc} の平均値 σ_{fc} となる。式(3)と式(5)を見比べて、 σ_{fc} は σ_m の1/3といえる。この σ_{fc} を以下では平均曲げ応力と称して第4章で検討する。

3. 付着試験におけるコンクリート強度の影響

3・1 付着強度と一軸圧縮強度

5段階のコンクリートの一軸圧縮強度 S_c [MPa]における、繊維の付着強度 τ_p [MPa]をFig. 3に示した。なお、付着強度の変動係数(同一条件で実施した試験から求めた変動係数)の平均値は4%程度であった。また、繊維の付着強度はコンクリートのせん断強度と密接な関係を持つと考えられるので、次式よりコンクリートのせん断強度 S_s [MPa]を推定した(Appendix I)。

$$S_s = 3.11 \left(\frac{S_c}{18} \right)^{0.785} \quad (6)$$

Fig. 3に、せん断強度の1.5, 1, 0.4, 0.2倍に対応する直線も示した。

もっとも高い付着強度を示した鋼繊維について検討してみる。単純に考えると付着強度は、上限がせん断強度 S_s で抑えられそうであるが、測定結果はせん断強度の約1.5倍前後となった。原

Fig. 3 Increase of bond strength with compressive strength of concrete. Rigid lines are calculated based on Eq. 6.

Fig. 4 Increase of fiber reinforcement σ_f with compressive strength of concrete.

因としては次の事項が考えられる。

1. 鋼繊維とコンクリートとの間に側圧力が働いている。
2. 使用した鋼繊維端部のフックに基づく抵抗力。

大久保ら⁹⁾は、フック無しの鋼繊維を用いて付着強度を測定し、その場合にも付着強度はコンクリートのせん断強度の約1.5倍であったと報告している。この結果から推測すると、上記の1と2に基づく抵抗力の中で、1の効果が過半を占める可能性が高い。

PO-1とPO-2の付着強度は、計算されたせん断強度の0.2倍程度となった。既に宮崎¹⁰⁾で指摘したように、剛性の小さい繊維がコンクリートから引抜かれるときには、繊維の口元(コンクリート表面)に近い部分が降伏し、降伏した部分が順次深部へと伝播していくと考えられる。このように考えれば、引抜抵抗が最大値をとるときには、繊維長に沿った付着応力は各部によって異なり、従って最大引抜抵抗から計算した付着強度はコンクリートのせん断応力よりもかなり小さいことが予想される。この点については、次節で考察する。

Fig. 3からわかるように、PO-3, PO-4とPVAの付着強度は、計算されたせん断強度の0.4倍程度となった。

繊維補強効果によりどの位の応力(normal stress)が発生するかを、式(2)に基づいて見積もってみた。繊維の配向係数は、繊維が三次元的にランダムに配向しているとして0.5とした。体積混入率を0.30%と仮定した時、PO-1およびPO-3繊維の繊維補強効果に基づく応力 σ_f とコンクリートの一軸圧縮強度との関係をFig. 4に描いてみたところ、直線関係があることがわかった。なお、 σ_f の変動係数は6%程度であり、図中の直線は最小二乗法

Fig.5 Decrease of bond strength with S/EA . Rigid line is calculated based on Eq. 8.

により求めた。同じように、他の繊維の σ_f とコンクリートの一軸圧縮強度との関係も描いてみた結果、いずれの場合にも、直線関係が認められ、コンクリートの一軸圧縮強度は繊維の補強強度に強い影響をおよぼすことを示唆した結果となった。

3・2 繊維の伸びの基礎式と付着強度

5種類の合成繊維について、コンクリートの一軸圧縮強度が増大すると共に、付着強度が高くなるが、鋼繊維と比較してかなり小さい値であった。これは、合成繊維の剛性がコンクリートと比較して格段に小さいため、引抜力に応じて変形（延伸）するためと考えられる。最初は繊維の口元だけに一番大きなせん断応力（端部に一番小さい）が加わり、穴の奥に位置する繊維側面には付着強度よりはるかに小さいせん断応力しか加わっていないにも拘わらず、口元がすべる（降伏する）。ついで、繊維とコンクリート壁との間のすべりは順次、穴の奥へと進んでいく。このようなモードのすべりは、もし、繊維の剛性が十分に高ければ生じないはずである。繊維の剛性が十分に高い場合には、繊維長方向のどの部位もが付着強度に達してから繊維はすべる（引抜かれる）はずである。これを繊維の伸びの基礎式に基づいて考察してみることにする。

繊維の伸び（歪）を表す基礎式は次式となる^{11,12}。

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \left(\frac{S}{EA} \right) \tau \quad (7)$$

ε : 繊維の歪（繊維長方向）

x : 繊維長方向にとった位置座標

S : 単位長さ当たりの繊維表面積

E : ヤング率

A : 繊維断面積

τ : x の位置での付着応力（せん断応力）

式(7)の S/EA [m/N] は、繊維表面に付着応力が加わると、どの位置で繊維が伸びるかを表す指標といえる。引抜試験に際してコンクリートに埋込まれている繊維が伸びれば、繊維表面とコンクリート間で部分的な降伏が生じやすいといえる。そこで、Fig. 5として、この S/EA を横軸にとり、縦軸にコンクリート強度が 21.6 MPa の時の付着強度 τ_p [MPa] の両対数グラフを描いてみた。この図からわかるように、本研究で実施した PO-1 ~ PO-4, PVA, SF では S/EA が大きくなるにしたがって、付着強度が下がる傾向がみられた。累乗で近似すると次式が得られたので参考までに示しておく。

Fig.6 Bond strength of steel fiber. Rigid line is calculated based on Eq. 10 following the previous result⁹. $\blacktriangle$ denotes measured result in this study. Fiber length is 15 mm.

$$\tau_p = 0.9495 \left(\frac{S}{EA} \right)^{-0.525} \quad (8)$$

3・3 過去の研究との比較

付着試験はこれまでも多く行われてきているが、その難点は使用したコンクリートの強度がまちまちであることである。そこで、比較的最近になって行われた付着試験で、コンクリートの強度が明示されている試験結果を今回の試験結果と比較検討してみることにした。

大久保ら⁹は鋼繊維を用い、埋込長さを変えた付着試験を実施して、付着強度に対して次の実験式を得ている。

$$\tau_p = \frac{20}{l_e^{0.2}} \quad (9)$$

ここに、 l_e は埋込長さ [mm] である。

本研究で使用した鋼繊維の S/EA が 0.025 m/N であったのに対して、大久保ら⁹の鋼繊維の S/EA は 0.033 m/N とやや大きめであった。また、使用したコンクリートの強度は 46.5 MPa であった。式(6)を参考にして、付着強度は S_c [MPa] の 0.785 乗に比例（せん断強度に比例）すると仮定して、式(9)を次のように書き換える。

$$\tau_p = \frac{20}{l_e^{0.2}} \times \left(\frac{S_c}{46.5} \right)^{0.785} \quad (10)$$

式(10)で、埋込長さ l_e を本研究と同じく 15 mm とした時の計算結果を Fig. 6 に実線で示した。Fig. 6 に、今回得られた鋼繊維の付着強度をプロットしてみたところ、試験結果はかなりばらつくが、実線のまわりに分布する結果となった。Fig. 5 にも、大久保ら⁹の鋼繊維試験結果をプロットしてみたが、実線に近いところに位置することがわかる。

宮崎ら¹⁰は、PET 繊維を用いて、埋込長さを変えた付着試験を実施して、付着強度に対して次の実験式を得ている。

$$\tau_p = \frac{11}{l_e^{0.5}} \quad (11)$$

使用したコンクリートの強度は 43.4 MPa であった。鋼繊維の場合と同様に、一軸圧縮強度の影響を考慮するために、式(11)に $(S_c/43.4)^{0.785}$ を掛け合わせることにした。PET 繊維の S/EA は 0.57 m/N であり、今回の研究で使用した繊維では PO-3 と PO-4 の S/EA の 0.61 m/N と比較的近い。そこで、今回の試験条件と比較・検討するために埋込長さ l_e を 15 mm としたときの計算結果を、

Fig. 7 Bond strength of synthetic fibers. Rigid and broken lines are calculated based on the previous result¹⁰⁾. Symbols denote measured results in this study. Fiber length is 15 mm.

実線にて Fig. 7 に示した。また、本研究における PO-3 と PO-4 の試験結果も同じ図にプロットしてみた。この結果をみると、実線で表される PET 繊維の付着強度は、PO-3、PO-4 に比較的近い値をとるといえる。参考までに、 S/EA が 0.24 m/N の PVA の結果も同じ図にプロットしてみたが、 S/EA がこれまでにみえた 3 繊維より比較的小さいにも拘わらず、付着強度は PET 繊維よりやや小さい。Fig. 5 にも既往の研究として、PET 繊維の結果をプロットしてみたが、実線に近いところに位置することがわかる。この図からも、PET 繊維は今回行った PO-3 や PO-4 と比較的近い結果であったことがわかる。

宮崎ら¹⁰⁾は、ポリプロピレン繊維 (PP 繊維) を用いた付着試験も実施して、付着強度に対して次の実験式を得ている。

$$\tau_p = \frac{11}{l_e^{0.2}} \dots\dots\dots (12)$$

使用したコンクリートの強度は 43.4 MPa であった。鋼繊維の場合と同様に、一軸圧縮強度の影響を考慮するために、これまでと同様に考えて $(S_c/43.4)^{0.785}$ を掛け合わせることにした。計算結果を実線で Fig. 7 に示したが、他繊維と比較してかなり大きな付着強度となることがわかる。この繊維の S/EA は 0.33 である。Fig. 5 にも PP 繊維の結果をプロットしてみたが、この場合にも付着力は実線よりもかなり大きくなっていることがわかる。

以上で、過去の研究結果を踏まえて検討してみたが、Fig. 5 からもわかるように、宮崎ら¹⁰⁾の行った PP 繊維の付着強度が実線よりも大きかったが、この繊維をあらためて調べてみると、深く長い凹凸が繊維の表面に刻まれており、多少繊維とコンクリート孔壁とがずれても、引拔力が低下しないことが、付着強度が大きくなった原因として考えられる。PO-3、PO-4 と PET 繊維は、 S/EA が近い値であり付着強度にも大差がなかった。この 3 種の繊維ともに表面には PP 繊維より浅めのインデント (凹凸加工) が施されていた。このように条件がほぼ揃っていたので、Fig. 5 では実線に近いところに 3 繊維ともにプロットできたのであろう。一方、PVA は目立ったインデント (凹凸加工) が施されておらず、付着が主に PVA とコンクリートのセメント水和生成物とのケミカル結合力によるものであるため¹³⁾、Fig. 5 で実線よりわずかながら下にプロットされる結果になった可能性がある。

4. 曲げ試験におけるコンクリート強度の影響

4・1 各繊維の特徴

コンクリートの一軸圧縮強度 35 MPa、繊維の体積混入率 0.30%

Fig. 8 Bending stress - midpoint deflection curves in four point bending tests. Uniaxial compressive strength of concrete: 35 MPa. Fiber volumetric content: 0.3 %.

Fig. 9 Bond stress - displacement curves in pullout tests. Uniaxial compressive strength of concrete: 35 MPa.

とした時の曲げ応力 - たわみ曲線を Fig. 8 に示す。また、この図を検討する際に参考にする、一軸圧縮強度 35 MPa とした時の PO-2、PO-3、PVA および鋼繊維の付着試験結果 (付着応力 - 引拔長さ線図) を Fig. 9 に示す。PO-1 は PO-2 と、PO-4 は PO-3 と似た傾向であったので、省略した。なお、同一条件で 3-4 回試験を行ったが、Fig. 8 と Fig. 9 には標準的と思われる一例を示した。

Fig. 8 を見ると、鋼繊維を含む各種繊維補強コンクリートの曲げ応力は、中央点たわみが小さい間、直線的に増加するが、ピーク値に達すると急激に低下した。宮崎らも同様の傾向を観察したと報告している¹⁴⁾。また、曲げ応力のピーク値はどの繊維でもほぼ同じであり、ピーク値までは繊維の補強効果は少ないことがわかる。ピーク値を越えた直後に曲げ応力は急激に低下するが、ある応力に達するとあまり低下しなくなる。この応力は鋼繊維では 3.2 MPa 程度であった。その他の繊維では 1.5 MPa 程度であり、繊維間の差は小さかった。

Fig. 9 をみると、鋼繊維ではわずかな引拔量で、付着応力が急激に増加し、また、その最大値も他の繊維と比較して格段に大きかった。鋼繊維は剛性が高い上に発生する付着応力も大きいので、曲げ応力がピーク値をとった直後に亀裂が入ると、速やかに補強効果が働くために 3.2 MPa 程度で、急激な曲げ応力の低下が止まり、その後の曲げ応力も他繊維と比較して大きかったといえよう。しかしながら、繊維の混入率が 0.3% とわずかであったので、ピーク値 (曲げ強度) はほとんど変化しなかったといえよう。

Fig. 8 を見ると、PO-1 ～ 4 の 4 種類の繊維では、鋼繊維と比較

Fig.10 Photos after the pullout test showing breakage of PVA fibers.

して剛性が低いので、亀裂がかなり開いてから、やっと補強効果が働く。そのためピーク値を越えて 1.5 MPa まで応力が急激に低下した。しかしながら、その後の応力低下はわずかであった。Fig. 9 に示した結果でも、PO-2 と PO-3 のピーク値は小さいが、その後の付着応力の低下は緩慢であった。

PVA 繊維も鋼繊維と比較して剛性が低く、たわみが 2 mm までの曲げ応力は、PO 繊維と大差なかった。しかしながら、たわみが 2 mm に達した後に、曲げ応力が急速に小さくなった。Fig. 10 には PVA 繊維の付着試験後の様子を示す。他の繊維では、繊維はコンクリートから徐々に引抜かれていき繊維は破断しなかったが、PVA 繊維では過半の繊維が試験途中で破断した。破断した繊維では、まず、局所的な伸びとそれに伴う断面積の縮小（ネッキング）が起こった。ついで、細くなった部分の繊維が細かく分岐した後に、分岐した細繊維が次々に破断した。同様なネッキング、分岐、破断は PVA 繊維の曲げ試験でも観察でき、それが生じはじめるのは、おおよそ中央点たわみ 1.5 mm 付近であった。

4・2 平均曲げ応力

繊維補強コンクリートの曲げタフネス係数 σ_m は、中央点たわみがスパンの 1/150 になるまでの曲げ荷重—たわみ曲線の面積から計算できる⁸⁾。また、 σ_m の 1/3 を平均曲げ応力 (Mean bending stress) σ_{fc} とした。曲げ試験によって求めた平均曲げ応力を Fig. 11 に示したが、付着強度と同様にコンクリートのせん断強度と密接な関係あると考えられるので、その 0.2, 0.15, 0.1 倍に対応する直線も同図に示した。なお、平均曲げ応力の変動係数は 4% 程度であった。Fig. 11 より、鋼繊維補強コンクリートの平均曲げ応力は、せん断強度の 0.15 ~ 0.2 倍であることがわかる。また、ばらつきは大きい、他の合成繊維補強コンクリートの平均曲げ応力は、せん断強度の 0.1 ~ 0.13 倍となった。

繊維補強コンクリートの平均曲げ応力は繊維の補強効果を表す指標であるため、付着試験から求めた繊維補強効果に基づく応力 σ_f (繊維の補強強度) と密接な関係があるはずである。そこで、PO-3 繊維を取りあげ、両者の関係を Fig. 12 に描いてみたところ、直線関係があることがわかった。なお、図中の直線は最小二乗法で求め、式 (5) における配向係数は繊維がランダムに配向しているとして 0.5 とした。Fig. 12 で、 σ_f と比較して平均曲げ応力の方が一貫して大きいのは、平均曲げ応力にはコンクリート自体を破壊するための仕事量が加算されていることが第一の原因といえる。なお、同じように、他種補強繊維の σ_{fc} と σ_f の関係も描いてみた結果、いずれの場合にも同様な関係が認められた。

5. ま と め

コンクリートの強度を 5 段階に変えて付着試験 (繊維引抜試験) をおこなった。その結果をみると、付着強度はコンクリートのせ

Fig.11 Increase of mean bending stress σ_{fc} of fiber with compressive strength of concrete. Rigid lines are calculated based on Eq. 6. Fig.12 Mean bending stress σ_{fc} vs. fiber reinforcement σ_f of PO-3 fiber.

ん断強度にほぼ比例することがわかった。同一条件での付着強度は鋼繊維が格段に大きかった。一方、他の合成繊維では、付着強度は比較的小さいが、引抜量が増加しても付着応力の低下はわずかであった。上記の傾向は、コンクリート強度を変えても同じであった。

付着強度は剛性の大きい鋼繊維で大きく、剛性の小さい合成繊維の付着強度は小さかった。これに関して S/EA を指標として、ある程度の説明を試みた。また、これまでにも多くの付着試験がおこなわれてきたが、コンクリート強度と繊維埋込長さが異なるので、試験結果の間の比較・検討が困難であった。本研究では、埋込長さ依存性に関する従来の研究結果を採用して、例えば式 (10) のように、コンクリート強度と埋込長さの両者を考慮した換算式を試用してみた。

同様にコンクリート強度を変えて曲げ試験をおこなった。繊維の体積混入率が小さかったために曲げ強度に対しては、繊維補強効果は認められなかった。しかしながら、曲げ応力がピーク値 (曲げ強度) をとった後には、明瞭な繊維補強効果が認められた。それを曲げタフネス係数およびその三分の一の平均曲げ応力で評価してみたが、コンクリートのせん断強度と密接な関係を有することがわかった。

Appendix I

コンクリートの一軸圧縮強度 S_c [MPa] からせん断強度を見積もってみることにした。まず、一軸圧縮強度から圧裂引張強度 S_t [MPa] を次式で推定する¹⁵⁾。

$$S_t = 0.23 S_c^{2/3} \dots\dots\dots (A1)$$

ついで、 S_c と S_t から次式でせん断強度 S_s [MPa] を推定する¹⁶⁾。

$$S_s = \frac{S_c S_t}{2\sqrt{S_t(S_c - 3S_t)}} \dots\dots\dots (A2)$$

今回の 20 MPa から 60 MPa の一軸圧縮強度をもつコンクリートの場合には、 S_s は次式で近似できる。

$$S_s = 3.11 \left(\frac{S_c}{18} \right)^{0.785} \dots\dots\dots (6)$$

References

- 1) H. Dong, S. Okubo and K. Fukui: Journal of MMIJ, **126** (2010), 654-659.
- 2) K. Fukui, S. Okubo, Q. Yang and T. Ochi: Journal of MMIJ, **112** (1996), 69-74.
- 3) H. Dong, H. Seki: Concrete Research and Technology, **20** (2009), 1-13.
- 4) Japan Concrete Institute: JCI-SF8, The bond test of fiber (1984), pp. 31-33.
- 5) T. Ochi, S. Okubo and K. Fukui: Cement & Concrete Composites, **29** (2007), 448-455.
- 6) JSCE-F-552: Method of making specimens for strength and toughness of steel fiber reinforced concrete, (1999), pp. 185-189.
- 7) Japan Highway Corporation: Tunnel construction management point, the part on fiber reinforced lining concrete, (2003).
- 8) Japan Concrete Institute: JCI-SF4, Test methods for flexural strength and toughness of fiber reinforced concrete (1984), pp. 11-17.
- 9) S. Okubo, K. Fukui, K. Miyazaki and T. Nakajima: Journal of MMIJ, **119** (2003), 741-746.
- 10) K. Miyazaki, S. Okubo and K. Fukui: Journal of MMIJ, **121** (2005), 363-369.
- 11) V. M. C. F. Cunha, J. A. O. Barros and J. M. Sena-cruz: Journal of Material in Civil Engineering, **20** (2010), 1-9.
- 12) F. Laranjeira, C. Molins, and A. Aguado: Cement and Concrete Research, **40** (2010), 1471-1487.
- 13) C. Redon, V. C. Li, C. Wu, H. Hoshino, T. Saito and A. Ogawa: Journal of Material in Civil Engineering, **13** (2001), 399-406.
- 14) K. Miyazaki, S. Okubo and K. Fukui: Journal of MMIJ, **123** (2007), 75-81.
- 15) K. Okada, K. Ito, A. Fuwa and I. Hirasawa: Reinforced concrete engineering, (Kajima-Shuppankai, Tokyo, 1997), pp. 9-10.
- 16) U. Yamaguchi and Y. Nishimatsu: Ganseki-Rikigaku-Nyuumon, (University of Tokyo Press, Tokyo, 1991), pp. 142-144.