

フック付き鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリートの引張特性

Tensile Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete with Hooked Fiber

魚本 健人*・西村 次男*・増田 健一*

Taketo UOMOTO, Tsugio NISHIMURA and Kenichi MASUDA

1. ま え が き

鋼繊維補強コンクリートは、近年吹付けコンクリートや建築物の土間コンクリートなどすでに多くの構造物に利用されてきているが、最近ではより重要な構造材料として鉄筋を用いないECL工法によるトンネルライニングなどへの適用方法について各種の検討がなされている。この場合特に重要なのは、鋼繊維補強コンクリートの引張特性および破壊靱性の評価として曲げ特性を設計時においてどのように考慮するかである。すでに各種の考え方が提案されているが、現在わが国で最も多く使用されているフック付き伸線ファイバーの場合には、基礎となる鋼繊維補強コンクリートの引張特性および曲げ特性に関するデータが必ずしも十分ではない。

そこで、本研究は、フック付き伸線ファイバーを用いた鋼繊維補強コンクリートの基礎的なデータを収集する目的で、寸法の異なるフック付き伸線ファイバーを用いた鋼繊維補強コンクリートの引張応力-変形曲線、曲げ応力-たわみ曲線および圧縮応力-変形曲線がどのように変化するかを実験的に調べるとともに、すでに明らかにされている異形カットワイヤーとどのように異なるかを検討したものである。

2. 実 験 概 要

表1に示すように、実験に用いた鋼繊維はフック付伸線ファイバー ($\phi 0.5 \times 30$ mm, $\phi 0.8 \times 30$ mm, $\phi 0.8 \times 60$ mm) で、セメントは普通ポルトランドセメント(3種類等量混合)、細骨材として大井川産川砂(比重2.62)、また粗骨材としては最大寸法20 mmの青梅産砕石(比重2.64)を用いた。コンクリートの配合は水セメント比50%とし、繊維混入率を0から2%の間で変化させ、スランプが 8 ± 1 cmとなるよう定めた。両引き試験、曲げ試験および圧縮試験体は、材令4週まで湿気養生とし、その後材令6週までの間に試験した。

*東京大学生産技術研究所 第5部

表1 実験一覧表

No	SF 種類	Vf (%)
1	プレーン	—
2	$\phi 0.5 \times 30$ (mm)	0.5
3		1.0
4		1.5
5		2.0
6		0.5
7	$\phi 0.8 \times 30$ (mm)	1.0
8		1.5
9	$\phi 0.8 \times 60$ (mm)	0.5
10		1.0

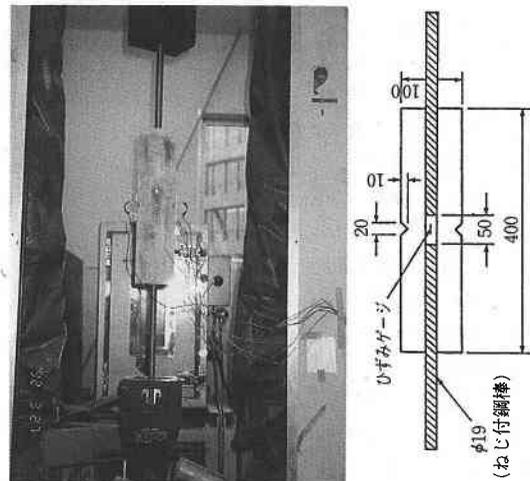


図1 両引き試験用供試体(単位:mm)

実験は、鋼繊維補強コンクリートの引張応力を求めるための両引き試験と、土木学会規準に定められた「曲げ強度および曲げタフネス試験方法」および「圧縮強度および圧縮タフネス試験方法」¹⁾により行った。

両引き試験では、小林らが提案した図1に示すような試験体²⁾($10 \times 10 \times 40$ cm)を用いた。すなわち、図に示すように鋼棒を試験体中心に配し、鋼棒とコンクリー

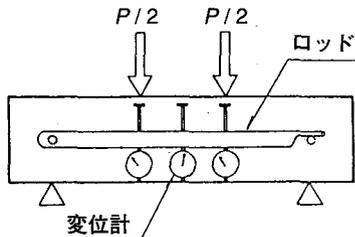


図2 たわみ量測定方法

トの付着を除く区間を中央部 5 cm とし、コンクリート中央部には切り欠き (深さ: 10 mm) を設けた。また、鋼棒中央部の表面にはり付けたゲージ長 5 mm のワイヤーストレインゲージの計測値から、両引き試験における鋼繊維補強コンクリートの分担力を求めた。両引き試験は、変位制御型載荷試験機 (10 ton オートグラフ) を用い、載荷速度を 0.5 mm/min とした。載荷時には鋼棒のひずみとコンクリート表面にはり付けたワイヤーストレインゲージおよび π 型変位計を連続的に測定した。

曲げタフネス試験では、曲げ試験体として $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱試験体を用いた。載荷は打設側面を載荷面とし、3 等分点 2 点載荷 (スパン: 30 cm) で行った。たわみ量の測定は図 2 に示すように支点沈下の影響を受けぬようロッドを試験体に取り付け、それを基準として求めた。なお、たわみ量の測定位置は図 2 に示すようにスパン中央点ならびに載荷点とした。載荷は油圧式載荷試験機 (最大荷重: 30 ton) を用いて行った。載荷速度は、ひび割れ発生前における緑応力度が $8 \sim 10 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ となるように調節し、その後は油の送りをそのままに保ち、中央たわみ量が 2 mm になるまでの荷重—たわみ曲線を求めた。圧縮タフネス試験では、 $\phi 10 \times 20$ cm の円柱試験体を用いた。変形量の測定にはコンプレッソメーターを用い、試験体の変形量がひずみに換算して 0.75% となるまでの荷重—変形曲線を求めた。載荷試験機は油圧式万能型試験機 (最大荷重: 100 ton) を用い、載荷速度は圧縮応力度の増加が $2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ とした。なお、曲げおよび圧縮の応力—たわみ曲線はコンピューターに取り込み、タフネスはたわみ軸とで囲まれる面積を数値積分して求めた。

3. 両引き試験による引張強度特性の検討

両引き試験から求めた鋼繊維補強コンクリートの引張応力—変形曲線の例を、繊維種類別 ($\phi 0.5 \times 30$ mm, $\phi 0.8 \times 30$ mm, $\phi 0.8 \times 60$ mm) に図 3 ~ 図 5 に示す。なお、試験後に破断面の鋼繊維を調べた結果、いずれの場合にも破断した鋼繊維は見あたらず、すべて引き抜きが生じていた。

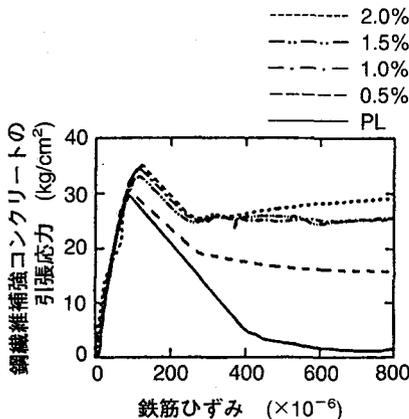


図3 $\phi 0.5 \times 30$ mm 鋼繊維使用

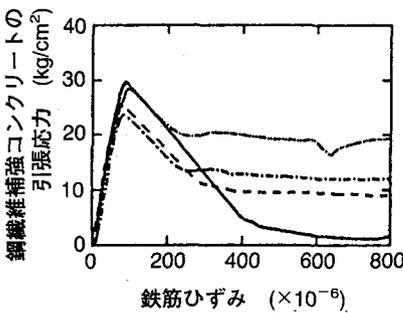


図4 $\phi 0.8 \times 30$ mm 鋼繊維使用

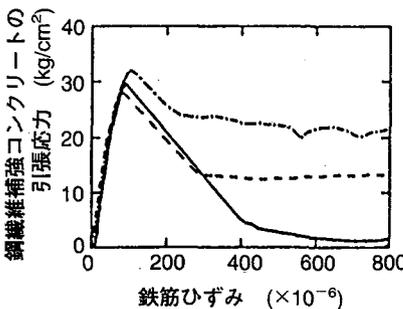


図5 $\phi 0.8 \times 60$ mm 鋼繊維使用

これらの図から明らかなように、得られたデータにかなりのバラツキが存在するものの、次に示すような傾向が認められる。

- ① 繊維混入率が大きくなるとわずかではあるがひび割れ発生までの引張応力が增大する。
- ② ひび割れ発生後の引張応力は 800×10^{-6} までの範囲においてほぼ一定の値となるが、その応力は繊維混入率が大きいほど大きい。
- ③ 同じ長さ 30 mm の鋼繊維でも、その直径が 0.5 mm より 0.8 mm の方が、ひび割れ発生時の応力のみならずひび割れ発生後の抵抗応力も小さくなる (図 3, 4 参照)。
- ④ 同じ直径 0.8 mm の鋼繊維では、長さが 30 mm より 60

研究速報

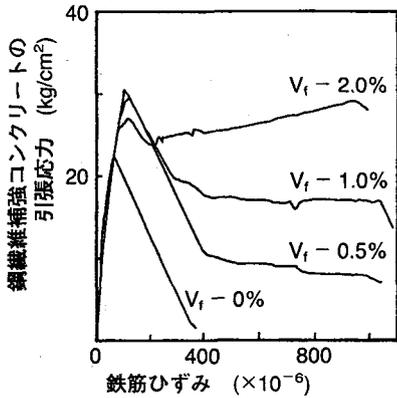


図6 異形カットワイヤー使用³⁾

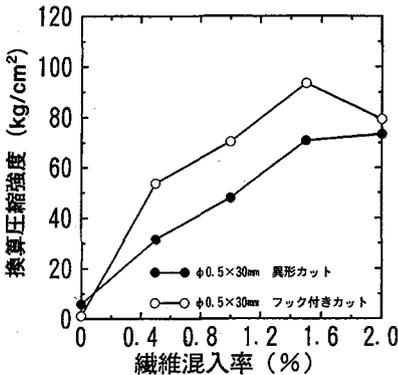


図7 繊維混入率と換算曲げ強度との関係

mmの方が、ひび割れ発生後の抵抗応力が大きい(図4, 5参照)。以上の結果のうち①および②については従来から言われているとおりであるが²⁾、③の結果は、鋼繊維の直径が大きくなると同じ繊維混入率であっても繊維本数が約40%に減少するため、コンクリートの補強効果が低下するだけでなく、繊維の引き抜き抵抗が減少するためであると考えられる。④は、繊維長さが大きいと引き抜き抵抗が大きいために生じていると考えられる。

今回の実験で用いたフック付き伸線ファイバーと比較するため、古越³⁾の行ったインデント加工の施されたφ0.5×30mmの異形カットワイヤーの引張応力-変形曲線を図6に示す。図4と図6を比較すると明らかに、いずれの繊維の場合もほぼ同様な傾向を示しており、その傾向に大きな違いはないが、フック付き伸線ファイバーの方が繊維混入率の小さい領域でひび割れ発生後の抵抗応力が大きいという傾向を示している。これは、繊維表面の凹凸による付着よりも、フック自体の変形によるエネルギーの吸収等が大きいために生じたものと考えられる。

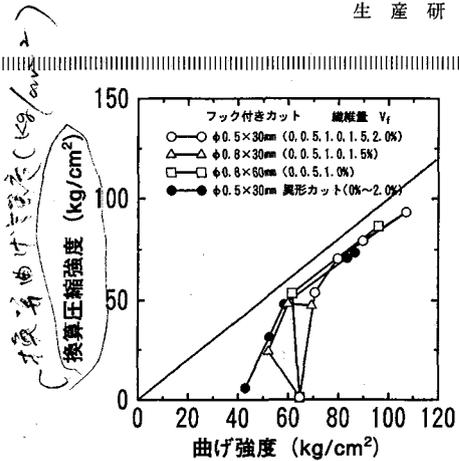


図8 曲げ強度と換算曲げ強度との関係

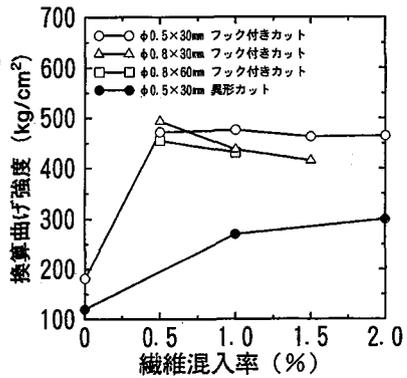


図9 繊維混入率と換算圧縮強度との関係

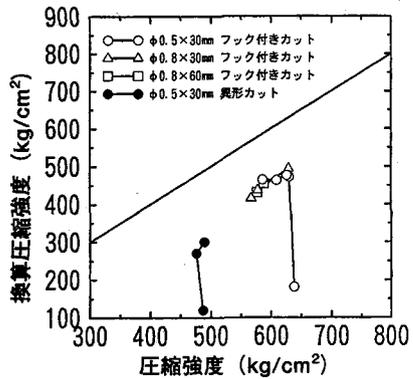


図10 圧縮強度と換算圧縮強度との関係

4. 曲げおよび圧縮試験によるタフネス評価

図7~図10は土木学会規準「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)」に定められた試験方法¹⁾により繊維混入率(Vf)を2%まで変化させた場合の曲げ-たわみ(基準たわみ量2mmまで)および圧縮の荷重-たわみ(歪みに換算して0.75%までの変形量)曲線を求め、それぞれのタフネス評価を行ったものである。今回の実

研究速報
 験で用いたフック付き伸線ファイバーと比較するため、魚本らの⁴⁾行ったインデント加工の施された $\phi 0.5 \times 30$ mm の異形カットワイヤーの結果との比較検討を行った。なお、特に結果を図示していないが、繊維混入率を変化させた場合の荷重-たわみ曲線は、 V_f が大きくなるほど最大荷重は増大し、また V_f 1% 以上では最大荷重以降の荷重低下は小さくなり、異形カットワイヤーの場合⁴⁾と同様な結果となった。

図7および図8は、曲げ試験から求めた繊維混入率と換算曲げ強度との関係および曲げ強度と換算曲げ強度との関係について示したものである。図7より、換算曲げ強度は繊維種類による違いはあるものの、繊維混入率が増加するにつれ増大している。中でも $\phi 0.8 \times 60$ mm のフック付き伸線ファイバーは高い換算曲げ強度が得られることが明らかである。また図8より、換算曲げ強度は、フック付き伸線ファイバー $\phi 0.5 \times 30$ mm では繊維量 1% 以上、 $\phi 0.5 \times 60$ mm では 0.5% 以上、インデント加工の施された $\phi 0.5 \times 30$ mm の異形カットワイヤーでは繊維混入率 1% 以上で繊維によるタフネスの改善効果はほぼ一定の比率となった。しかしフック付き伸線ファイバー $\phi 0.8 \times 30$ mm は、他のものと異なり繊維によるタフネスの改善効果があまりみられない。この原因として、繊維直径が $\phi 0.5$ mm のものと比べ試験体中に混入される繊維本数が 40% に減少するだけでなく、付着長さが短いため繊維による補強効果に限界が存在することなどがあげられる。なお、破壊試験後に破断箇所における繊維分布を調べたところ、引張線の繊維本数が非常に少なく、この鋼繊維の場合には繊維の分散があまり良くないことも原因の一つであると考えられる。これらのことから鋼繊維の場合には、繊維の分散についてもアスペクト比が何等かの影響を及ぼしていると予想される。

図9および図10は、圧縮試験から求めた繊維混入率と換算圧縮強度との関係および圧縮強度と換算圧縮強度との関係について示したものである。図9より、曲げ強度の場合と同様に、いずれの繊維においてもブレンコンクリートに比べ鋼繊維補強コンクリートの換算圧縮強度は増大しているが、フック付き伸線ファイバーは異形カットワイヤーとは異なり、繊維混入率が 0.5% 以上になると換算圧縮強度はほぼ一定となる。しかし、繊維寸法が $\phi 0.8 \times 30$ mm および $\phi 0.8 \times 60$ mm では繊維混入率が増加するにつれて強度は若干低下する傾向が認められる。この原因として、いずれの繊維も $\phi 0.5 \times 30$ mm の繊維に比べ繊維本数が約 40% および 20% と少なく、繊維による拘束効果が小さいことがあげられる。このような現象は曲げおよび引張の場合には認められなかったが、圧縮時に発生する引張応力に対しては繊維間隔による補

強効果が卓越するためであると考えられる。また、図10より曲げの場合と異なり、繊維混入率が 0.5% 以上であれば、いずれの繊維であっても繊維による圧縮タフネスの改善効果はほぼ一定の比率となっている。

5. ま と め

フック付き伸線ファイバーを使用した鋼繊維補強コンクリートの特性として、本研究で得られたことをまとめると次のとおりとなる。

- ① 引張強度は、バラツキが大きく鋼繊維の寸法が異なっても大きな違いは認められなかった。しかし、3. で述べたように引張応力-変形曲線は鋼繊維の寸法が異なると、ひび割れ発生後の抵抗応力に違いが認められ、繊維直径が小さいほどまた繊維長さが長いほど大きな値となった。また、すでに発表されているインデント加工を施された $\phi 0.5 \times 30$ mm の異形カットワイヤーと比較しても、寸法が同じであれば大きくは変わらないことが明らかとなった。
- ② 曲げ強度は、フック付き伸線ファイバーを用いた $\phi 0.5 \times 30$ mm および $\phi 0.8 \times 60$ mm では繊維混入率が 0.5% 以上で換算曲げ強度と曲げ強度は近い値となり、異形カットワイヤーの繊維混入率 1% 以上となるのに比べタフネスの改善効果が著しく表れていることが明らかとなった。しかし $\phi 0.8 \times 30$ mm においてはタフネスの改善効果はあまり見られず、これらを用いる場合には今後アスペクト比や骨材寸法等について考慮する必要がある。
- ③ 圧縮強度は、曲げ強度と同様にいずれの繊維においても繊維混入率が増加することによって換算圧縮強度も増大している。また換算圧縮強度と圧縮強度では強度の違いはあるもののいずれの繊維でも 0.5% 以上になるとほぼ一定な値となる。これらのことから圧縮力を受けた試験体が軸直角方向に膨脹する際に鋼繊維による拘束が有効に作用したものと考えられる。

最後に、本研究を実施するにあたり、鋼繊維を提供して頂いた(株)ブリヂストンに感謝いたします。

(1992年9月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 鋼繊維補強コンクリート設計施行指針(案) : コンクリートライブラリー第50号 土木学会 1983.3
- 2) 小林一輔 : 繊維補強コンクリート-特性と応用一, オーム社
- 3) 古越, 魚本, 西村 : 鋼繊維補強コンクリートを用いた梁の曲げ性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次講演会講演 論文集, 第5回, 1983
- 4) 魚本, 小林, 西村 : 鋼繊維補強コンクリートの曲げタフネス評価方法, 生産研究 第34巻12号 1982.12