

# 鋼繊維とポリエチレン繊維による混成 繊維補強コンクリートの曲げ特性

Flexural Behavior of Steel Fiber and Polyethylene Fiber Hybrid Reinforced Concrete

小林一輔\*・趙力采\*・西村次男\*・今泉和郎\*

Kazusuke KOBAYASHI, Ryokche CHO, Tsugio NISHIMURA and Kazuro IMAIZUMI

## 1 はし が き

筆者らは最近国内で開発された高密度ポリエチレン繊維を混入した繊維補強コンクリートの曲げ特性とその耐力機構について検討し、この種のコンクリートは、i) ひびわれ発生荷重は普通コンクリートと大差ないが、一たん耐力が低下したのち変形の進行とともに繊維が伸長して耐力を増すこと、ii) 繊維混入率の如何によってはひびわれ荷重を上廻る最大耐力に達し、その後もゆるやかに耐力が減少するので、従来の繊維補強コンクリートでは得られなかったようなすぐれた靱性を示すこと、などを明らかにした。一方、現在、繊維補強コンクリートの主流となっている鋼繊維補強コンクリートは、普通コンクリートに比し、ひびわれ荷重は著しく増大するが、その後の耐力の低下が比較的急激であるため、靱性は上記のポリエチレン繊維補強コンクリートに比べると劣っている。筆者らは、これらの力学的特性の異なる2つの繊維補強コンクリートを複合することによって、ひびわれ強度と靱性のいずれもが著しく改善されるような繊維補強コンクリートを得ることを目的として検討を進めた結果、ひびわれ強度はほぼ鋼繊維補強コンクリートと同等で、しかも変形が相当に進行してもほとんど耐力の低下を生じないような高靱性の繊維補強コンクリートの製造に成功したので、この結果について報告する。

なお、2種の繊維補強コンクリートの複合は、鋼繊維にポリエチレン繊維をある比率で混合したものをマトリックスコンクリート中に分散させることによって行ったこの方法で、前記のような高靱性の繊維補強コンクリートを得ようとする場合、検討すべき要因としては、鋼繊維及びポリエチレン繊維の混入量と載荷速度があげられる。本研究では鋼繊維及びポリエチレン繊維を各々単独で混入した繊維補強コンクリートについて、これらの曲げ特性に及ぼす繊維量と載荷速度の影響を調べ、この結果を参考にして混成繊維補強コンクリートの実験における2つの実験要因、即ち繊維混入率と載荷速度の両者の水準を定めた。

## 2 鋼繊維及びポリエチレン繊維補強コンクリートの曲げ挙動に及ぼす載荷速度及び繊維量の影響

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

**2.1 繊維混入率の影響** 図-1(a)と図-1(b)はそれぞれポリエチレン繊維と鋼繊維補強コンクリートの曲げ挙動に及ぼす繊維混入率の影響を示したものである。図から明らかなように、ポリエチレン繊維補強コンクリートの場合、繊維混入率の大きいものほど、ひびわれ発生後の曲げ性状が改善され、耐力の低下が小さくなることがわかる。一方、鋼繊維補強コンクリートの場合には繊維混入率の大きいものほど、ひびわれ強度ならびに最大曲げ強度が改善されることになる。

**2.2 載荷速度の影響** 図-1(c)と図-1(d)はそれぞれポリエチレン繊維と鋼繊維補強コンクリートの曲げ挙動に及ぼす載荷速度の影響を示したものである。ポリエチレン繊維補強コンクリートの場合、載荷速度が大きくなるほど、i) ひびわれ発生荷重と耐力の1時低下のあとの第2のピーク値(◎印)が増大すること、ii) その後の耐力の低下率はやや大きくなること、などの傾向が認められる。一方鋼繊維補強コンクリートの場合、載荷速度が大きいものほど、前者と同様にひびわれ強度が大きくなるが、その後の変形の増大に伴う耐力の低下はむしろ著しくなることがわかる。

## 3 混成系繊維補強コンクリートの曲げ特性と各種要因の影響

**3.1 混成系繊維を用いることの意義** 図-2(a)はそれぞれ繊維混入率を2.0%一定とした場合の鋼繊維及びポリエチレン繊維補強コンクリートならびに混成系繊維(SF:1.0%+PF:1.0%)を用いた繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ挙動を示したものである。この図から明らかなように、混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ性状は鋼繊維またはポリエチレン繊維をそれぞれ単独で用いたものに比べて相当に異なってくる。すなわち、その曲げ荷重-たわみ挙動は、i) 鋼繊維補強コンクリートに比し、最大荷重は低いが、その後の変形に伴う耐力の低下は非常に小さくなる、ii) ポリエチレン繊維補強コンクリートにおけるひびわれ発生直後の一時的な耐力の低下がなくなり、同時にその後の荷重-変形性状も改善される。一般に鋼繊維の混入量の増加は、コンクリートのコンシステンシーの著しい低下、セメント使用量の増大及び価格の増大面で好ましくない

研究速報

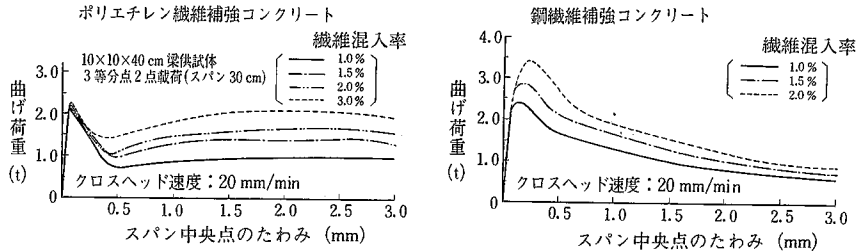


図-1(a) ポリエチレン繊維及び鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ性状に及ぼす繊維混入率の影響

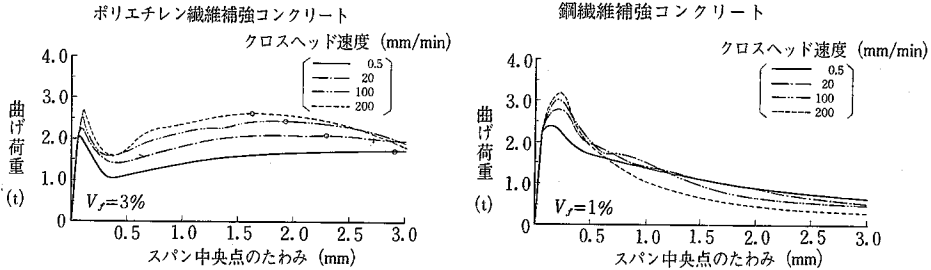


図-1(b) ポリエチレン繊維及び鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ性状に及ぼす荷速度の影響

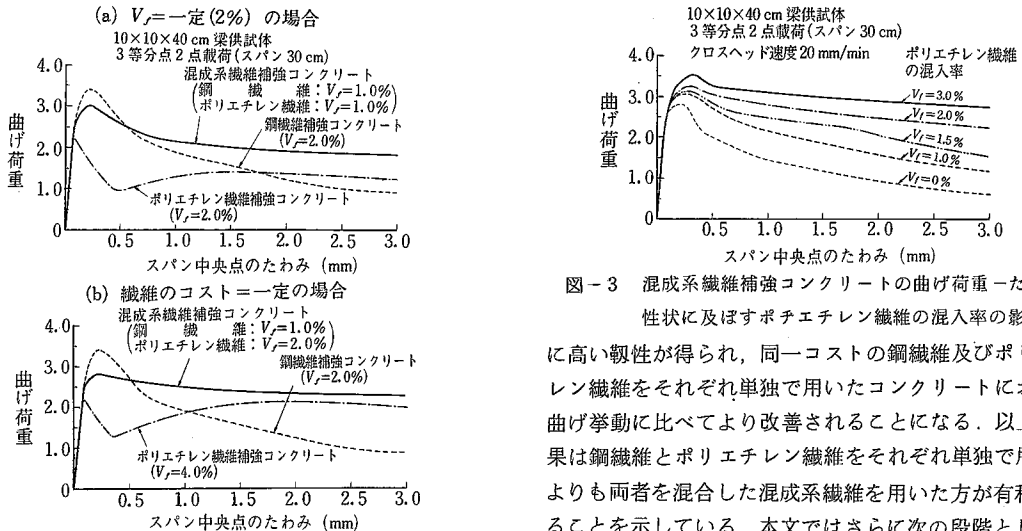


図-2 混成系繊維補強コンクリートの特性

が、ポリエチレン繊維の場合はその価格が同一容積の鋼繊維の価格のほぼ1/2と考えられること、ならびにコンクリートのコンシステンシーの低下が少ないことなどから鋼繊維の場合ほど大きい問題にはならない。図-2(b)は施工が可能な同一配合のコンクリートマトリックスを用いて、繊維のコストが鋼繊維の2%の混入量に相当する、ポリエチレン繊維の混入量を4%、混成繊維の混入量を3%と定め、(鋼繊維=1%、ポリエチレン繊維=2%)、これらによる繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ挙動を比較したものである。この図から明らかなように、混成繊維を用いたものは、図-2(a)の場合に比べてポリエチレン繊維の量が増加していることによって、さら

図-3 混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ性状に及ぼすポリエチレン繊維の混入率の影響

に高い靱性が得られ、同一コストの鋼繊維及びポリエチレン繊維をそれぞれ単独で用いたコンクリートにおける曲げ挙動に比べてより改善されることになる。以上の結果は鋼繊維とポリエチレン繊維をそれぞれ単独で用いるよりも両者を混合した混成系繊維を用いた方が有利であることを示している。本文ではさらに次の段階として、コンクリートとしての施工が可能な範囲で最もすぐれた靱性が得られるような鋼繊維とポリエチレン繊維の組み合わせについて検討を行った。その結果を3.2以降に示す。

が可能な範囲で最もすぐれた靱性が得られるような鋼繊維とポリエチレン繊維の組み合わせについて検討を行った。その結果を3.2以降に示す。

3.2 ポリエチレン繊維の混入率の影響 図-3は混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの曲げたわみ挙動に及ぼすポリエチレン繊維の混入率の影響を示したものである。なお、図中の点線は鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線を示している。図から明らかなように、混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわ

研究速報

み挙動は、i) 最大荷重が鋼繊維のみを用いたものより高い値を示し、また対応するたわみ値も大きくなること、ii) その後の変形に伴う耐力の低下が非常に小さくなること、iii) ポリエチレン繊維の混入率が大きいものほど、前2者の傾向がさらに顕著となること、などの特性を示す以上の結果は鋼繊維とポリエチレン繊維を併用することによってそれぞれの弱点がカバーされ、すぐれた点が集約的に発輝されて、いわゆる複合効果が生じたことを示すものである。

**3.3 荷重速度の影響** 図-4(a)~(d)は、それぞれポリエチレン繊維の混入率を1.0~3.0%まで変化させた場合について、混成系繊維を用いたコンクリートの曲げ荷重-たわみ性状に及ぼす荷重速度の影響を示したものである。この図より、荷重速度が大きくなる程、i) 最大荷重の値が増大し、この傾向はポリエチレン繊維混入率の如何を問わず認められること、ii) 最大荷重が増大し(図中の点線)、この傾向はポリエチレン繊維の混入率を増すほど顕著になること、iii) 最大荷重以後の耐力の低下率が著しくなること、などが明らかである。以上の結果は、荷重速度が大きいもの程最大荷重が増大する反面、耐力の低下率が大きくなるという鋼繊維とポリエチレン繊維を単独で用いたコンクリートの曲げ荷重変形特性が混成系繊維を用いた場合にも加成的に表されているものと見ることができる。

**3.4 曲げ靱性** 図-5はポリエチレン繊維と鋼繊維から成る混成系繊維補強コンクリートの単調曲げ荷重と繰り返し曲げ荷重による荷重-たわみ曲線を示したものである。なお点線は各繰り返し荷重時の最大荷重の包絡線を示したものである。この図から明らかなように、最大荷重以降に繰り返し荷重を行うと、ひびわれ幅の拡大

によって残留たわみ量が増大するにもかかわらず、単調曲げ荷重-たわみ曲線とはほぼ同様な荷重-たわみ性状を示す。また、たわみ量が6mmに達したとき(鋼繊維のみを1%混入したときの破断時たわみ)において最大荷重の約75%の耐力を保持しており、すぐれた靱性を示すことがわかる。なお繊維の長さにも関係するが、この場合たわみ量が約10mmに達した時、耐力を失うことが確認された。

このような、繊維補強コンクリートの靱性を正しく評価する方法は未だ確立されていないが、ここでは耐力が最大荷重の80%に達するまでの曲げ荷重-たわみ曲線と横軸(たわみ軸)とに囲まれる面積を求め、これを鋼繊維補強コンクリートの場合の値を基準として定量的に評価した結果を表-1に示す。なお、各荷重速度における結果はその荷重速度で得られる鋼繊維補強コンクリートの面積を基準として示した。表-1より、混成系繊維補強コンクリートの曲げ靱性は、i) ポリエチレン繊維の混入率が大きいもの程増大し、ポリエチレン繊維を3.0%混入したものは、荷重速度が0.5mm/minにおいて鋼繊維補強コンクリートの約10倍、20~200mm/minの荷重速度では約8倍に達する、ii) いずれのポリエチレン繊維の混入率においても、荷重速度が0.5mm/minの場合が

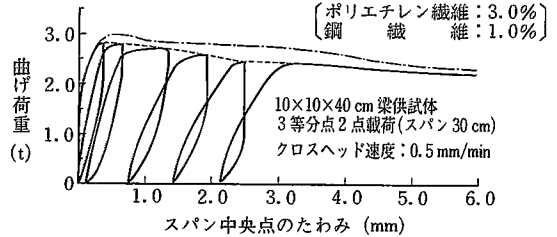


図-5 混成系繊維補強コンクリートの繰り返し荷重変形性状

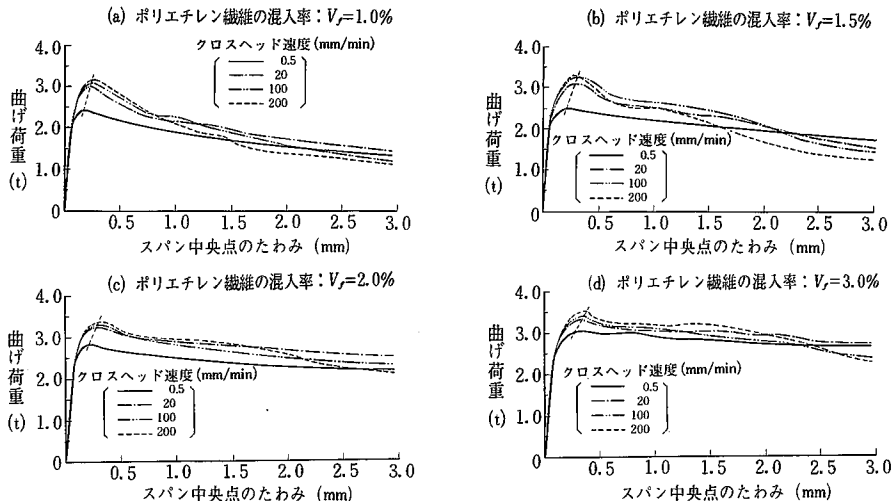


図-4 混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ性状に及ぼす荷重速度の影響(鋼繊維の混入率:  $V_f = 1.0\%$ )

研究速報

最も大きい値を示し、載荷速度が20~200mm/minの範囲ではほぼ同程度の値を示す、などの傾向を有することが認められる。以上により、混成系繊維補強コンクリートは現在主流となっている鋼繊維を単味で使用した繊維補強コンクリートでは得られなかったすぐれた靱性を示すことが明らかとなった。

4 鋼繊維とポリエチレン繊維による混成系繊維補強コンクリートの強化機構

鋼繊維とポリエチレン繊維による混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重-変形曲線を図-6(a)のように表し、これを破壊過程に基づいていくつかの領域に分割し、強化機構を考えることにする。まず荷重-変形曲線の全過程を初期ひびわれ荷重時までの領域(I)とその後破壊に至るまでの領域(II)に大別する。領域(I)は、点線で示した同一繊維混入率の鋼繊維補強コンクリートの挙動によって支配される。即ち、この領域では普通コンクリートの曲げ荷重より高いひびわれ発生荷重を示し、ポリエチレン繊維はヤング率が相当に低いために、ひびわれ抑制に関しては全く寄与しないことになる。領域(II)は主として鋼繊維の補強効果によって得られる最大荷重に達し、その後は大きな変形時でも耐力の低下が極めて小さい優れた靱性を示す領域である。

ここで領域(II)における強化特性を明らかにするために、まずポリエチレン繊維補強コンクリートの耐力機構について検討を加える。図-6(b)はポリエチレン繊維補強コンクリート( $V_f=3.0\%$ )の単調漸増載荷によって求めた荷重-たわみ曲線(実線)とひびわれ発生後、ポリエチレン繊維のみが全曲げ荷重を受け持った場合の荷重-たわみ曲線(点線)を示したものである。なお、後者の曲線はひびわれ発生後直ちに除荷し、再載荷して求めたもので、bc部分は前者の曲線とほぼ一致することを確認している。このことは、混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの、初期ひびわれ発生以後の曲げ耐力は鋼繊維補強コンクリートの曲げ耐力にポリエチレン繊維のみによる耐力が加算されたものと考えてよく、ポリエ

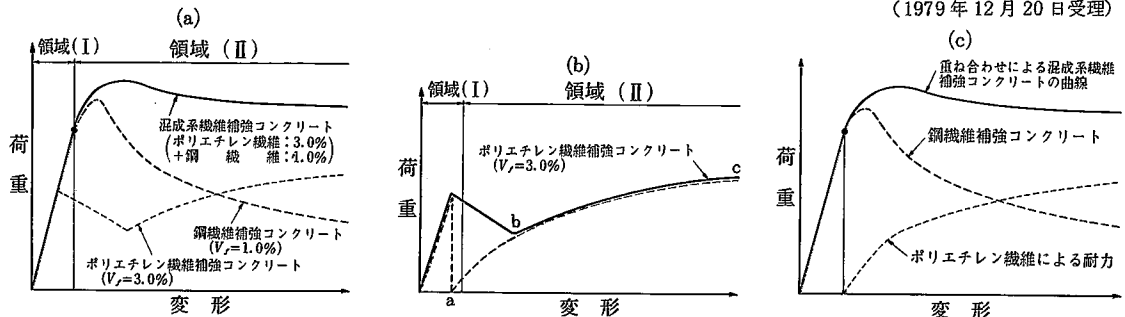


図-6 混成系繊維補強コンクリートの耐力機構

表-1 混成系繊維補強コンクリートの曲げ靱性

種別	繊維量( $V_f$ :%)		載荷速度(mm/min)			
	PF	SF	0.5	20	100	200
混成系	1.0	1.0	2.47	1.91	1.41	2.00
	1.5	1.0	5.46	2.89	4.78	2.20
	2.0	1.0	7.59	5.91	5.20	5.69
	3.0	1.0	10.14	8.40	8.30	8.20
単一	0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

ポリエチレン繊維:1.5%, 鋼繊維:1.0%  
の混成系繊維を用いた場合  
10×10×40cm 梁供試体  
3等分点2点載荷(スパン30cm)

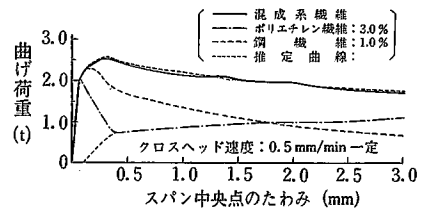


図-7 混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線の推定

チレン繊維の曲げ耐力は曲線abcの関係を領域(I)と(II)の境界まで平行移動したような形で寄与することを意味している。したがって、混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線は、図-6(c)に示すように、図-6(a)の鋼繊維補強コンクリートの荷重-たわみ曲線(破線)とポリエチレン繊維のみが荷重を受け持っているときの曲げ耐力(点線)との重ね合わせによって求められ、実験で示されるような性状となることが考えられる。

図-7は以上の考えに基づいて、(PF=1.5%+SF=1.0%)の混成系繊維を用いたコンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線を鋼繊維補強コンクリートとポリエチレン繊維のみによる曲線を重ね合わせて推定できるかどうかを示したものである。この図から明らかのように、推定曲線(点線)は実験による混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線とよく一致している。

(1979年12月20日受理)