

[52] 高靱性繊維補強コンクリート

正会員 小林 一 輔 (東京大学生産技研)
 正会員 ○ 趙 力 采 (東京理工専門学校)
 今 泉 和 郎 (三井石油化学工業)
 正会員 西 村 次 男 (東京大学生産技研)

1. はしがき

著者らは、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、ひびわれ強度や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。

この、2種の繊維補強コンクリートの複合は、鋼繊維に最近国内で開発された高密度ポリエチレン繊維をある比率で混成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得られるものである。この方法で、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夫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を用いた繊維補強コンクリートの実験要因、即ち繊維混入率と載荷速度の両者の水準を定めた。

2. 実験の概要

使用した高密度ポリエチレン繊維は比重が0.96、長さが40mm、換算径が0.9mmで、軸方向に一定間隔の枝状の突起を有するものである、また鋼繊維は $0.3 \times 0.7 \times 3.0$ mmのせん断ファイバーを用いた。

鋼繊維とポリエチレン繊維の混成比率は、鋼繊維の混入率をすべて1.0%とし、これに対してポリエチレン繊維をそれぞれ1.0、1.5、2.0及び3.0%を組合せた4種とした。なお、鋼繊維とポリエチレン繊維をそれぞれ単独で用いた場合についても実験を行った。コンクリートマトリックスの水セメント比は50%とし、セメントは早強ポルトランドセメント、粗骨材は最大寸法が15mmの碎石を用いた、曲げ強度試験のための供試体としては $10 \times 10 \times 40$ cmの梁を用い、3等分点2点載荷(スパン:30cm)で曲げ試験を行った。一方、載荷は変位制御型の材料試験機(インストロン社のフロアー型TT試験機)を用い、載荷速度はクロスヘッドの速度を毎分0.5、20、100及び200mmの4種とした。

3. 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繊維混入率と載荷速度の影響

図-1(a)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、繊維混入率が大いものほど、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いものほど、初期ひびわれ強度ならびに曲げ強度が改善されることになる。

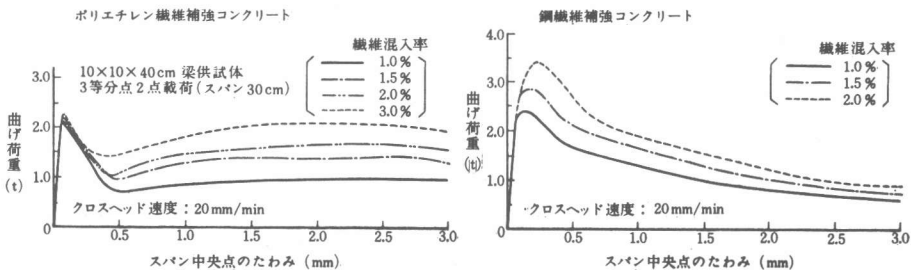


図-1(a) ポリエチレン繊維及び鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ性状に及ぼす繊維混入率の影響

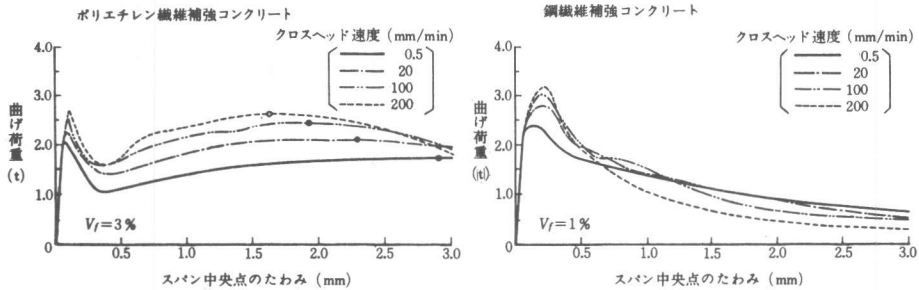


図-1 (b) ポリエチレン繊維及び鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重—たわみ性状に及ぼす載荷速度の影響

図-1 (b)はそれぞれ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一時低下のあとの第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。

4. 混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの曲げ特性と各種要因の影響

4.1 ポリエチレン繊維の混入率の影響

図-2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、優れた点が集約的に発揮されて、所謂複合効果が生じたことを示すものである。

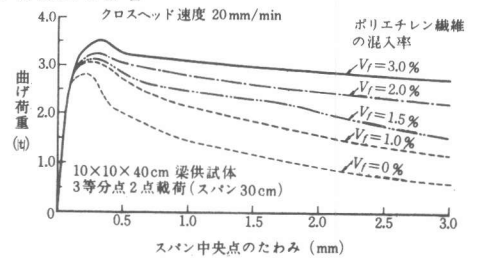


図-2.混成系繊維補強コンクリートの曲げ荷重—たわみ性状に及ぼす繊維混入率の影響

4.2 載荷速度の影響

図-3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載荷速度の影響を示したものである。この図より、載荷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の混入率の如何を問わず認められること、ii) 最大荷重に対応するたわみ量も増大し(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、載荷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われたものと見ることができる。

4.3 曲げ靱性

図-4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載荷と繰り返し曲げ載荷による荷重—たわみ曲線を示したものである。なお、点線は各繰り返し載荷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載荷を行うと、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—たわみ曲線とほぼ同様な荷重—たわみ性状を示す。

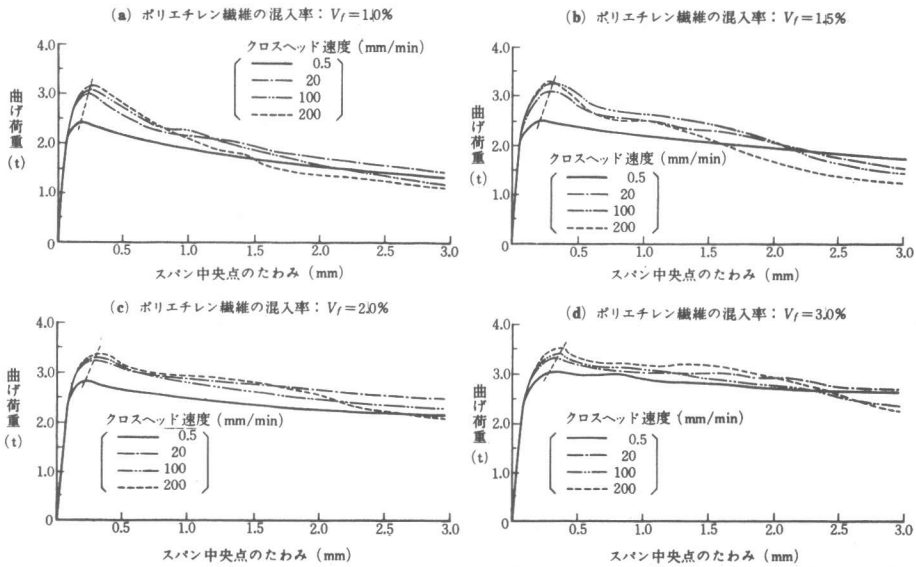


図-3. 混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ性状に及ぼす載荷速度の影響

(鋼繊維の混入率: $V_f = 1.0\%$)

また、たわみ量が6mmに達したとき(鋼繊維のみを1.0%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、ここでは最大荷重以降の耐力が、その80%に低下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、各載荷速度における結果はその載荷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、ポリエチレン繊維の混入率が大きいものほど増大し、例えばポリエチレン繊維を3.0%混入したものは、これを全く混入しないものに比し、0.5mm/minの場合には約10倍、20~200mm/minの場合には約8倍となることがわかる。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。

5. 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-5(a)のように表わし、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。

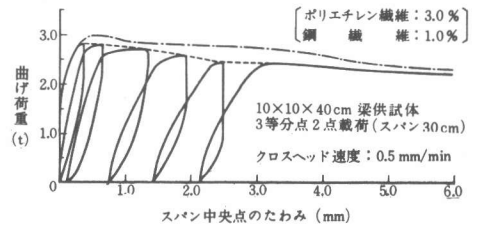


図-4. 混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの繰返し曲げ荷重変形状

表-1. 混成系繊維補強コンクリートの曲げ靱性

種別	繊維混入率 (V_f) (%)		載荷速度 (mm/min)			
	ポリエチレン繊維	鋼繊維	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

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殆ど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依存する最大荷重までの領域と、その後の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から成っている。

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考察を加える。図-5 (b) はポリエチレン繊維補強コンクリート ($V_f = 3.0\%$) の単調漸増荷重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、b c 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曲げ耐力は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耐力が加算されたものと考えてよく、ポリエチレン繊維の曲げ耐力は曲線 a b c 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。

従って、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-5 (c) に示すように、図-5 (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受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ることになる。

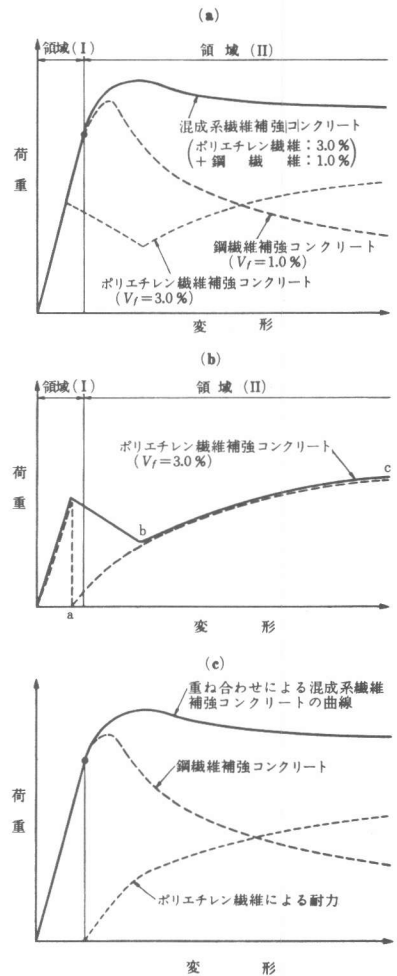


図-5. 混成系繊維補強コンクリートの曲げ耐力機構

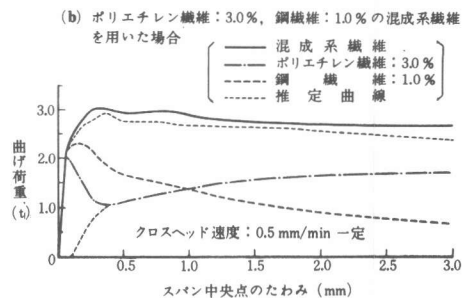
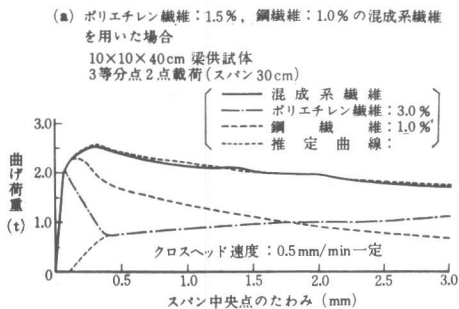


図-6. 混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線の推定

図-6 (a) と図-6 (b) は以上の考え方に基づいて、それぞれ (鋼繊維: 1.0% + ポリエチレン繊維: 1.5%) ならびに (鋼繊維: 1.0% + ポリエチレン繊維: 3.0%) 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。これらの図から明らかなように、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。