

論文 高強度・高靱性セメント系複合材料に関する基礎的実験

荒井正直^{*1}・田村 博^{*2}・大橋正治^{*3}

要旨：高強度・高靱性セメント系複合材料の開発に主眼を置くなかで、その基礎的段階として、短繊維補強モルタルを用いた圧縮および曲げ試験を行い、その強度特性および靱性について検討した。主な実験要因としては、1)繊維の種類（2種類の短繊維を混合使用した）、2)繊維混入率（ワーカビリティを配慮した上で最も高い繊維混入率を決定した）、3)マトリックス強度（高強度マトリックスとした）である。その結果、圧縮試験において、2種類の短繊維を混合使用して補強したいわゆるハイブリッド繊維補強モルタル供試体では、高強度・高靱性を示すことなどがわかった。

キーワード：高強度、高靱性、ハイブリッド、繊維混入率、短繊維

1. はじめに

コンクリート固有の脆性的性質を改善する手法の1つに、鋼繊維や近年開発が盛んな合成繊維などの短繊維をコンクリート中に分散混入させて、機械的補強の効果が得られる短繊維補強コンクリートを利用することが有効である¹⁾²⁾。しかしながら、短繊維補強コンクリートとしては、容積比で1%程度混入したものが、その実用化の大半を占めているのが現状である。また、脆性的性質が特に問題となる対象は、近年の技術開発の進歩によって普及している高強度コンクリートが挙げられ、その靱性改善は重要な課題といえる³⁾⁴⁾。

本研究は、高強度・高靱性セメント系複合材料の開発を目的としている。そこで、今回はその基礎的段階として、短繊維補強モルタル供試体を用いた圧縮および曲げ試験を行い、その強度特性および靱性について検討した。主な実験要因としては、1)繊維の種類、2)繊維混入率、3)マトリックス強度である。1)については、鋼繊維、ビニロン繊維および両者を混合使用したのを用いた。特に、両者を混合使用したのものについては、鋼繊維、ビニロン繊維の個々の特性⁵⁾が、

ハイブリッド化によって、全体系に及ぼす影響（例えば、支配的な特性など）を検討するために行ったものである。2)については、比較的良好なワーカビリティであることを前提として、繊維混入率の最大値を決定した。3)については、高強度なモルタルマトリックスを対象としたが、比較用に、普通強度のモルタルマトリックスにおいても同様の実験を行った。

2. 実験の概要

2.1 供試体の製作

本実験では、圧縮および曲げ試験用モルタル供試体（それぞれφ10×20cm および10×10×40cm）のいずれも、各調合(全調合は10種類)毎に3体、合計30体製作した。モルタルの調合および練混ぜ方法をそれぞれ表-1 および図-1に

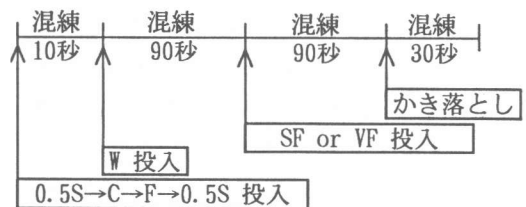


図-1 練混ぜ方法

*1 (財) 日本建築総合試験所 材料試験室 工博 (正会員)

*2 (財) 日本建築総合試験所 材料試験室室長 工博 (正会員)

*3 (財) 日本建築総合試験所 材料試験室 (正会員)

表-1 繊維補強モルタルの調合

記号	水セメント比 W/C (%)	単位量(kg/m ³)						鋼繊維 混入率 (vol%)	ビニロン繊維 混入率 (vol%)	混和剤 (kg/m ³)
		水	セメント	細骨材	石灰石粉	鋼繊維	ビニロン繊維			
		W	C	S	F	SF	VF			
SF7%	35.0	270	771	1035	-	550	-	7.0	-	3.86
SF4%	35.0	270	771	1035	-	314	-	4.0	-	3.86
SF4%+VF3%	35.0	270	771	1035	-	314	39	4.0	3.0	3.86
VF3%	35.0	270	771	1035	-	-	39	-	3.0	3.86
PLAIN	35.0	270	771	1035	-	-	-	-(7°レ-ン)		3.86
SF7%	65.0	270	415	1046	295	550	-	7.0	-	3.55
SF4%	65.0	270	415	1046	295	314	-	4.0	-	3.55
SF4%+VF3%	65.0	270	415	1046	295	314	39	4.0	3.0	3.55
VF3%	65.0	270	415	1046	295	-	39	-	3.0	3.55
PLAIN	65.0	270	415	1046	295	-	-	-(7°レ-ン)		3.55

- 1) セメント：普通ポルトランドセメント 比重3.15
- 2) 細骨材：千葉県木更津 比重2.62(表乾) 吸水率1.52%
- 3) 混和剤：高性能減水剤 使用量=(C+F)×0.5%

示す。水セメント比を 0.35 および 0.65 とし、マトリックスの強度レベルを高強度および普通強度の 2 種類とした。また、使用した短繊維は、鋼繊維 (φ0.6×30mm の三日月型両端フック付、記号：SF) およびビニロン繊維 (φ0.67×30mm、記号：VF) と、両者を混合したもの (以下、混合繊維と呼ぶ、記号：SF+VF) である。今回の実験では、ワーカビリティを目視観察によって判断すると、繊維混入率 7vol%が上限であり、その上限値 7vol%を混入できた短繊維は、鋼繊維および混合繊維 (鋼繊維 4vol%+ビニロン繊維 3vol%) の 2 種類であった。なお、比較用として、鋼繊維 4vol%およびビニロン繊維 3vol%を単独で混入した繊維補強モルタル供試体と、繊維無混入のプレーンモルタル供試体も同時に製作した。

練混ぜには、容量 30 ℓ のオムニミキサを用い、25 ℓ パッチとした。供試体の製作方法は、土木学会標準 JSCE-F 552(鋼繊維補強コンクリートの強度およびタフネス試験用供試体の作り方)に準拠し、また、養生方法は、供試体打設の翌日に脱型し、材齢 28 日まで、温度 20±2℃の標準水中養生とした。

2.2 試験方法

圧縮および曲げ試験方法は、それぞれ、土木学会標準 JSCE-G 551(鋼繊維補強コンクリートの

圧縮強度および圧縮タフネス試験方法)および JSCE-G 552(鋼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)に準拠した。なお、圧縮試験では圧縮ひずみが 3%に達するまで、また、曲げ試験ではたわみが 5mm に達するまでを計測したが、両試験とも目標値に達する以前に計測不能になったものについては、その時点で試験を終了した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および圧縮タフネス試験

(1) 圧縮応力-圧縮ひずみ関係

図-2 および図-3 は、それぞれ、マトリックスの強度レベルが高強度(W/C=0.35)および普通強度(W/C=0.65)である繊維補強モルタル供試体の圧縮応力-圧縮ひずみ曲線を示したものである。なお、同図には、比較用のプレーンモルタル供試体の結果も併示した。両図において繊維混入率 7vol%の場合をみると、図-2 の高強度マトリックスでは、混合繊維(SF4%+VF3%)を用いた方が鋼繊維(SF7%)を用いた場合よりも圧縮ひずみ 0.75%以降の変形抵抗性が大きくなっているものの、図-3 の普通強度マトリックスでは、混合繊維(SF4%+VF3%)を用いた方が、変形抵抗性は若干小さくなっている。すなわち、圧縮ひずみ 0.75%以降の挙動においては、ハイブリッド化 (繊維

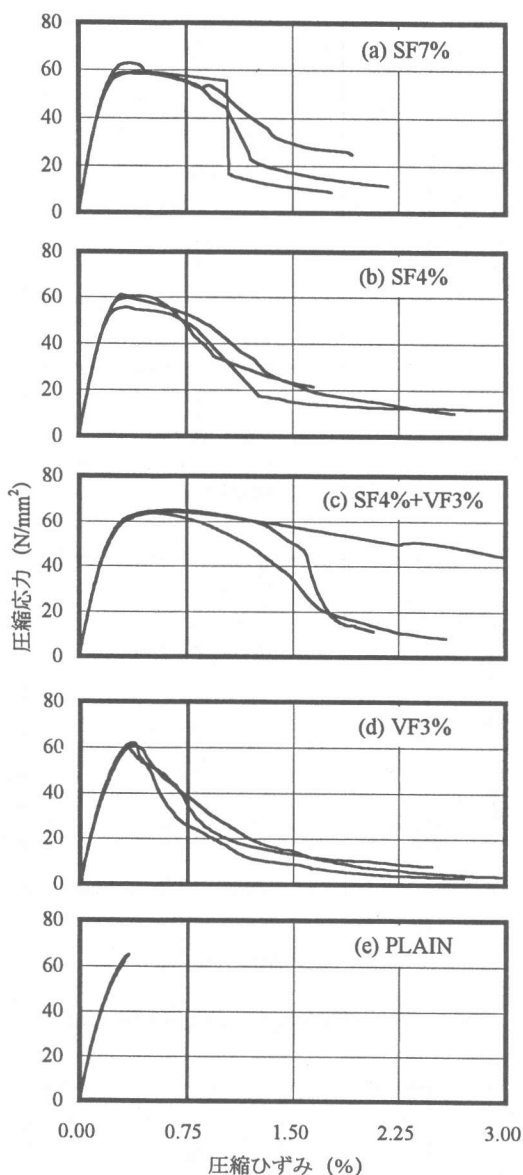


図-2 圧縮応力-圧縮ひずみ曲線
(マトリックス：高強度)

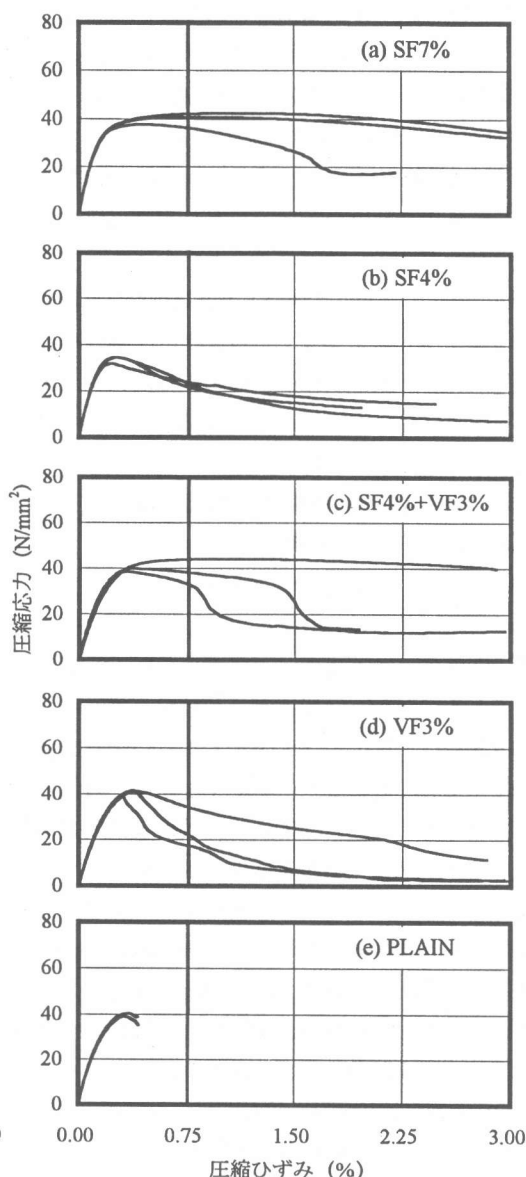


図-3 圧縮応力-圧縮ひずみ曲線
(マトリックス：普通強度)

の混合)により高い靱性が得られ、その効果はマトリックスの強度レベルが高い方が顕著であるといえる。

(2) 圧縮強度、靱性係数および強度比

図-4、図-5 および図-6 は、それぞれ、圧縮強度、圧縮靱性係数および圧縮強度比と繊維混入率の関係を示したものである。なお、圧縮強度、圧縮靱性係数および圧縮強度比は、各調

合で製作した 3 体の供試体の測定値を平均したものである。また、圧縮強度比は、圧縮靱性係数を圧縮強度で除して算出した値である。

図-4 によると、圧縮強度に及ぼす繊維の種類、混入率の影響はほとんど見られず、マトリックス強度の影響が支配的であるといえる。

図-5 によると、繊維混入率が高くなるほど、圧縮靱性係数は大きくなっている。また、圧縮

靱性係数に及ぼす繊維補強の効果は、高強度マトリックスの方が顕著である。さらに、同一の繊維混入率である SF4%+VF3%と SF7%では、両者の圧縮靱性係数に差異は見られない。これは、圧縮靱性係数が、圧縮ひずみ 0.75%までの挙動に対して算出されているためであり、それ以降の変形能(靱性)については上述したとおりである。

図-6 によると、繊維混入率が高くなるほど、圧縮強度比も高くなっている。また、繊維補強モルタルの圧縮強度比は、同じ繊維混入率の場合、高強度マトリックスと普通強度マトリックスではほぼ一致している。

3.2 曲げ強度および曲げタフネス試験

(1) 曲げ応力-たわみ関係

図-7 および図-8 は、それぞれ、マトリックスが高強度および普通強度である繊維補強モルタル供試体の曲げ応力-たわみ曲線を示したものである。なお、同図には、比較用のプレーンモルタル供試体の結果も併示した。いずれの図においても、繊維混入率が高くなるほど最大曲げ応力は大きく、若干応力下降域が脆性的になっており、マトリックス強度の違いによらず、両者はほぼ類似した曲げ変形性状示している。また、繊維混入率が 7vol%である SF4%+VF3%と SF7%を比較すると、たわみが 2mm を超える範囲においても、両者の変形抵抗性には差異が見られず、圧縮試験結果とは異なり、ハイブリッドの効果が今回の実験では得られなかった。

(2) 曲げ強度、靱性係数および強度比

図-9、図-10 および図-11 は、それぞれ、曲げ強度、曲げ靱性係数および曲げ強度比と繊維混入率の関係を示したものである。なお、曲げ強度、曲げ靱性係数および曲げ強度比は、各調合で製作した 3 体の供試体の測定値を平均したものである。また、曲げ強度比は、曲げ靱性係数を曲げ強度で除して算出した値である。

図-9 によると、繊維混入率が 3%までは、曲げ強度に及ぼす繊維混入率の影響はほとんど見られないが、繊維混入率が 3%を超える範囲では、繊維混入率が高くなるほど曲げ強度は大きくな

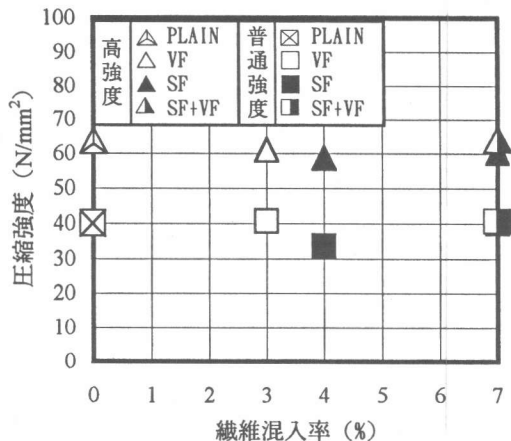


図-4 圧縮強度と繊維混入率との関係

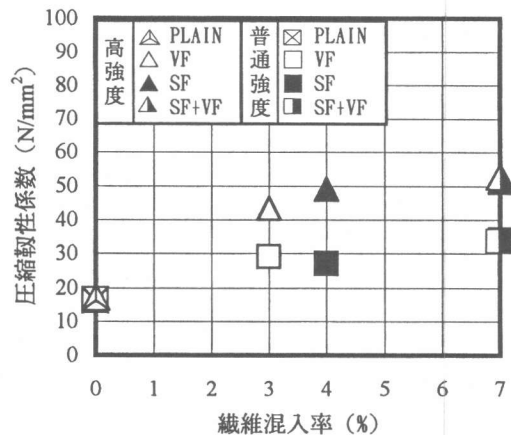


図-5 圧縮靱性係数と繊維混入率との関係

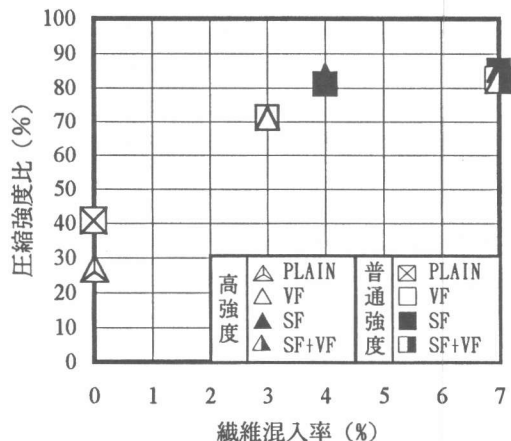


図-6 圧縮強度比と繊維混入率との関係

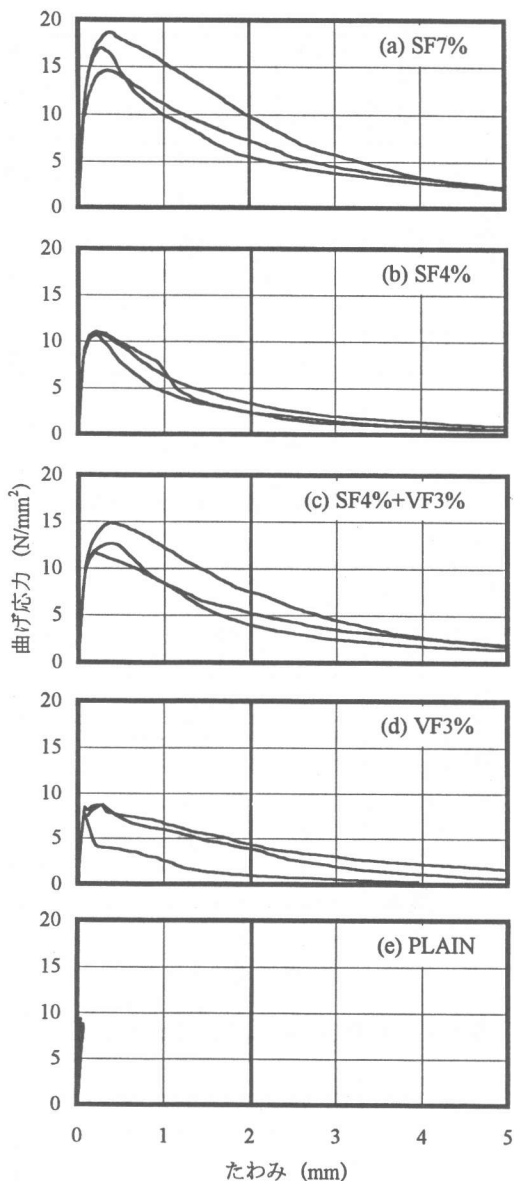


図-7 曲げ応力-たわみ曲線
(マトリックス：高強度)

っている。また、繊維混入率が 7vol%である SF4%+VF3%と SF7%を比較すると、前者よりも後者の方が曲げ強度は大きく、その傾向は高強度マトリックスの方が顕著である。

図-10によると、繊維混入率が高くなるほど、曲げ靱性係数は大きくなっている。また、繊維混入率 7vol%である SF4%+VF3%と SF7%の比較においても、曲げ強度と同様、SF4%+VF3%より

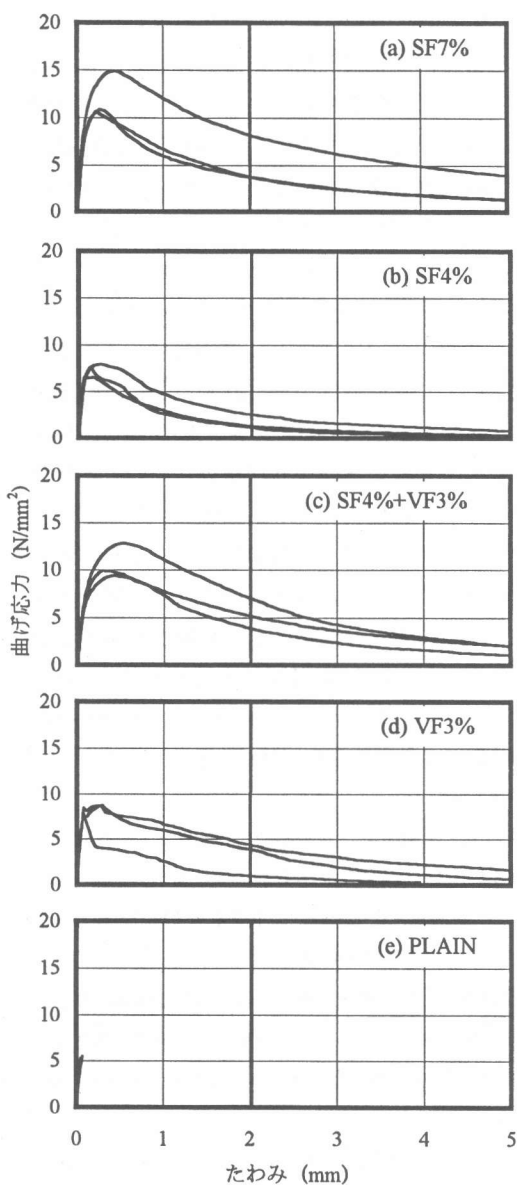


図-8 曲げ応力-たわみ曲線
(マトリックス：普通強度)

も SF7%の方が曲げ靱性係数は大きくなっている。

図-11によると、繊維混入率が高くなっても、必ずしも曲げ強度比は大きくなっておらず、両者の間に相関は見られない。また、同一の繊維混入率の下で、高強度マトリックスと普通強度マトリックスの曲げ強度比を比較すると、両者はほぼ一致しているか、あるいは後者の方が大きくなっている。

4. まとめ

本稿は、高強度・高靱性セメント系複合材料の開発を主目的とするなかで、その基礎的な段階として、短繊維補強モルタルを用いた圧縮および曲げ試験を行い、その強度特性および靱性について検討した。本実験結果は、非常に限定された条件下でのものであり、特に、曲げ試験については新たな知見が得られなかったものの、圧縮試験においては、高ひずみ域でハイブリッド化により高い靱性が得られた。今後、短繊維の選定や組合せ（ハイブリッド化）、また、短繊維とマトリックスの相互作用等についてより詳細な検討が必要であるが、高強度コンクリートの普及によってさらに重要視されている靱性向上の課題に対して、本研究のようなアプローチが1つの改善策の糸口となる可能性があると思われる。なお、本研究は、「高引張強度・高靱性コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会」の活動のなかで行ったものである。

[参考文献]

- 1) 村上聖, 三井宜之, 岸谷孝一, 平居孝之, 鹿毛忠継 : 繊維補強コンクリートの破壊力学に関する研究—その1.各種繊維による補強, 日本建築学会構造系論文報告集, No.404, pp.1~6, 1989.10
- 2) 三橋博三, 野村希晶, 桐越一紀: 破壊力学手法に基づく繊維補強セメント系複合材料の力学特性に関する一考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.449, pp.1~7, 1993.7
- 3) 橋高義典, 大岡督尚: 高強度モルタルマトリックスの破壊パラメータに及ぼす短繊維の影響—高強度繊維補強コンクリート(HFRC)の破壊性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.497, pp.1~8, 1997.7
- 4) 橋高義典, 大岡督尚: 高強度コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入の影響—高強度繊維補強コンクリート(HFRC)の破壊性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.501, pp.7~12, 1997.11
- 5) Katz, A. : Effect of Fiber Modulus of Elasticity on the Long Term Properties of Micro-fiber Reinforced Cementitious Composites, Cement and Concrete Composites, Vol.18, pp.389~399, 1996

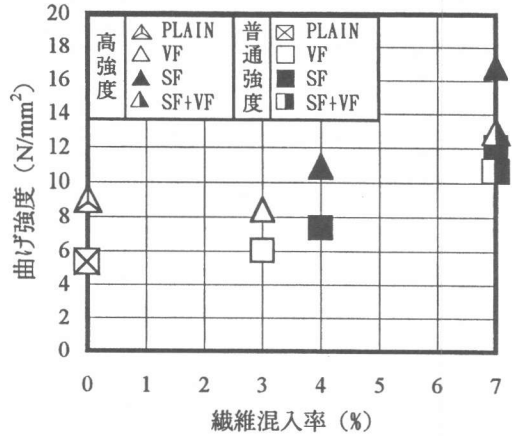


図-9 曲げ強度と繊維混入率との関係

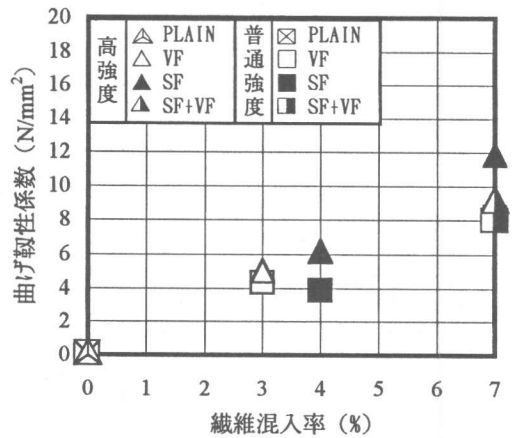


図-10 曲げ靱性係数と繊維混入率との関係

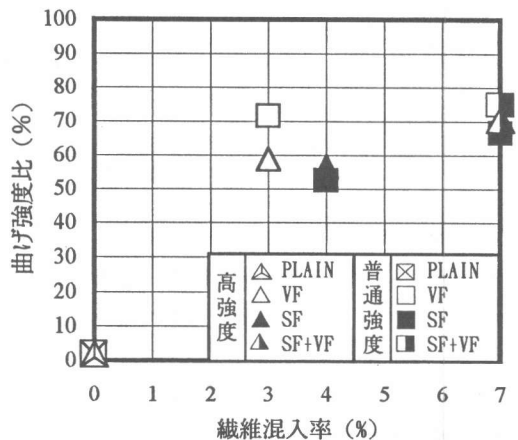


図-11 曲げ強度比と繊維混入率との関係