

論文 バサルト繊維を用いた短繊維補強コンクリートの基礎的検討

田中 章*1・田中 徹*2・仁平 達也*3・村井 和彦*4

要旨: バサルト繊維を樹脂で被覆した短繊維 3 種類を用いて、繊維単体の引抜き性状および硬化後の力学的特性について検討した。引抜き試験の結果、配向角度が小さい場合、捻り加工や凹凸加工を施さない繊維形状では引抜き挙動を示し、繊維単体のエネルギー吸収量が大きくなることを確認した。また、曲げタフネスは、ひび割れ面での繊維本数と繊維単体のエネルギー吸収量が関係し、同繊維を用いた場合、繊維長 40mm、混入率 1.0Vol% で、同一繊維長、混入率の鋼繊維と同程度の曲げタフネスを有することを確認した。

キーワード: 短繊維補強コンクリート、バサルト繊維、単繊維引抜き試験、力学的特性、曲げタフネス

1. はじめに

短繊維をコンクリートやモルタルに混入することで、引張強度や曲げ靱性、ひび割れの抑制などの性能が向上することが明らかとなっており、短繊維補強コンクリートとして様々な構造物での利用が始まっている¹⁾。短繊維補強コンクリート用の繊維としては、金属繊維である鋼繊維や、有機繊維であるポリプロピレン繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維などが主要な繊維として挙げられるが、例えば鋼繊維では、繊維の腐食が生じることや²⁾、一部の有機繊維では、紫外線により劣化することが報告されており³⁾、このような繊維自体の劣化によって、期待される性能が確保できない可能性があることが課題として挙げられる。

そこで筆者らは、これらの課題を解決するための方法として、バサルト繊維に着目した。バサルト繊維は、玄武岩を融解して製造される新材料の無機繊維で、繊維自体の腐食が生じないことや、紫外線劣化しにくいことが特徴として挙げられる。現状では、既設トンネル覆工の内面補強工法として、帯状に加工した補強プレートにバサルト繊維を採用した実績がある⁴⁾。しかし、バサルト繊維は、主成分が二酸化ケイ素でアルカリに弱いとされ⁵⁾、短繊維補強コンクリートへ適用した事例は少なく、その力学的特性は明らかになっていない。

本研究では、鋼繊維補強コンクリートの施工実績を参考に⁶⁾、普通コンクリート（圧縮24～60N/mm²）を対象とし、バサルト繊維の短繊維補強コンクリートへの適用性について基礎的な検討を実施した。具体的には、耐久性の向上を目的に繊維表面をビニルエステル樹脂で被覆処理したバサルト繊維をセメントペーストに埋め込んだ単繊維の引抜き試験を行い、繊維の形状が、ひび割れ面で架橋した際の引抜き性状に与える影響について検討し

た。次に、引抜き試験で検討した繊維の形状や繊維長、混入率が、圧縮強度や曲げタフネスなどの硬化後の力学的特性に及ぼす影響について、鋼繊維およびポリプロピレン繊維との比較を行いながら検討した。

2. 検討に用いた繊維

図-1に繊維の形状を示す。また、表-1に検討に用いた繊維の主な物性を示す。バサルト繊維は、玄武岩を1500°C程度で溶融押し出し（遠心）紡糸し、得られた直径13μmの繊維を束ねて製造され、これを束ねたものがバサルト繊維となる。束ねる繊維は、過去の検討結果⁷⁾を参考に、792tex（1tex=単位長さ1000mあたりの繊維の重さが1g）とし、本検討では、264texの繊維を3本束ねたBF-A、繊維自体の曲げ剛性を高めるために繊維を3本束ね200回転/mで繊維を捻ったBF-B、セメントペーストとの付着力向上を目的に顕著に表面に凹凸を設けるため、繊維を2本束ねたもの（芯材）の周囲に1本（カバー糸）を絡ませたBF-Cの3種類を用いた。また、比較対象として用いた繊維には、表面に凹凸加工が施されているポリプロピレン繊維⁸⁾（以下、PP）と両端にフック加工が施されている鋼繊維（以下、SF）とした。

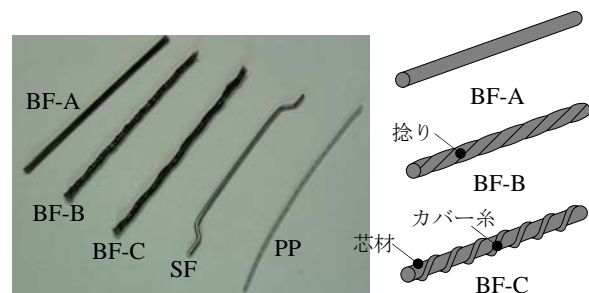


図-1 検討に用いた繊維の形状

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

*2 戸田建設 (株) 価値創造推進室 技術開発センター 工修 (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (工学) (正会員)

*4 戸田建設 (株) 価値創造推進室 技術開発センター 博士 (工学) (非会員)

表-1 検討に用いた繊維の主な物性値

試験体	芯材 (本)	カバー 糸 (本)	密度 (g/cm ³)	平均 断面積 (mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)	引張 弾性率 (kN/mm ²)	破断時 伸び率 (%)
BF-A	3	-	1.68	0.65	882.7	30.1	3.2
BF-B	3	-	1.83	0.73	585.4	26.8	3.1
BF-C	2	1	1.53	0.92	593.7	29.9	3.8
SF	-	-	7.85	0.60	1070	200	-
PP	-	-	0.91	0.36	500.0	7.0	10.0

※BFは実測値(JIS K 6911に準拠), PPおよびSFはカタログ値
※BFの平均断面積=繊維1mあたりの重量/繊維の密度

表-2 力学特性試験に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
50	60	350	175	1039	713

3. 試験概要

3.1 単繊維の引抜き試験

図-2, 図-3 に試験体および試験状況の例を示す。本試験では, BF シリーズと PP を対象として, マトリクスに埋め込んだ単繊維試験体を用い, 図-3 の試験方法で繊維を引抜き, 荷重と変位を測定した。

試験体は, 骨材の影響を除外することを目的としてセメントペースト(W/C=50%)に繊維単体を埋込み, 繊維の定着長は, 3.2 節にて使用した最大繊維長(50mm)と試験体が製作可能な最小定着長を基に, 25mm と 10mm とした(図-2)。また, 引抜き角度(以下, 配向角度)は, ひび割れ面に対して繊維が垂直に引抜かれた場合を想定した角度を配向角度 0° と定義した。ただし, 短繊維補強コンクリートでは, 内在する繊維がランダムな角度に分散していることが前提となっているので, 定着長 25mm のケースを対象に, 図-3 に示した角度調整治具を用いて, 配向角度が, 15°, 30°, 60°における引抜き試験を実施した。試験時の引抜き速度は 2.0mm/分一定とし, 繊維の破断もしくは繊維が引抜けるまで実施した。

SF は端部にフックがあるため, 引抜き試験における定着長を同一で比較することが困難なことを考慮し, 使用した繊維は BF と PP とした。

3.2 力学的特性確認試験

硬化後の力学的特性は, 圧縮強度試験(JIS A 1108 準拠), 静弾性係数(JIS A 1149 準拠), 割裂引張強度試験(JIS A 1113 準拠), 曲げタフネス試験(JSCE-G 552 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法準拠)について実施した。表-2 に本試験で使用したコンクリートの配合条件を示す。コンクリートの配合は, 鋼繊維補強コンクリートの施工実績を参考に⁶⁾, 最大粗骨材寸法(Gmax)は 20mm, 水セメント比(W/C)は 50%, 細骨材率(s/a)は 60%とした。繊維長は, Gmax の 2 倍である 40mm を基本とし, BF を用いたケースでは, 繊維長による影響を確認するため, 30mm, 50mm の場合についても試験を実施した。なお, 本検討で使用した

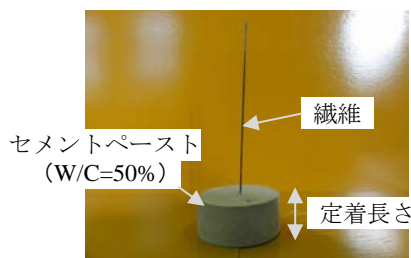


図-2 引抜き試験体(定着長さ 25mm の例)

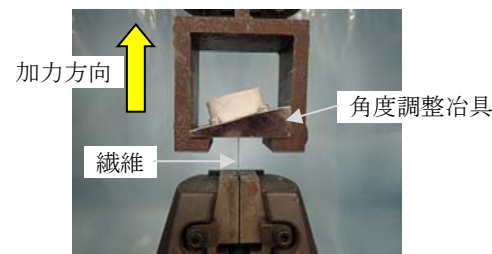


図-3 引抜き試験状況(配向角度 15° の例)

表-3 引抜き試験結果一覧

試験体	定着長さ (mm)	配向 角度 (度)	繊維の拔出			繊維の破断		
			本数 (本)	最大 荷重 (N)	エネルギー 吸収 (N・mm)	本数 (本)	最大 荷重 (N)	エネルギー 吸収 (N・mm)
BF-A	10	0	5	187	910	-	-	-
		25	0	2	485	3861	1	558
	25	15	-	-	-	3	511	739
		30	-	-	-	4	257	221
BF-B	10	0	5	334	1371	-	-	-
		25	0	-	-	5	446	777
	25	15	-	-	-	5	395	626
		30	-	-	-	5	348	481
BF-C	10	0	5	410	1219	-	-	-
		25	0	-	-	5	568	1050
	25	15	-	-	-	5	476	869
		30	-	-	-	5	129	100
PP	10	0	5	65	454	-	-	-
		25	0	4	135	2574	-	-
	25	15	3	122	2265	2	173	1213
		30	1	127	2170	2	163	1107
		60	-	-	-	5	123	427

※各ケースとも5体試験し, 測定不良のケースは除外

PP は, 繊維製造の都合上, 40mm の繊維を製造していないため, 30mm と 48mm の 2 種類について試験を実施した。繊維の混入率は, 1.0Vol% を基本とし, BF を用いたケースでは, 混入率の違いによる影響を確認するため, 繊維長 40mm のケースを対象に 0.5Vol%, 1.5Vol% の場合についても試験を実施した。なお, 試験体は, 打設の翌日に脱型をし, 20°C で 27 日間水中養生をした後, 材齢 28 日で強度試験を実施した。また, コンクリートのフレッシュ性状は, 例えば, 繊維長 40mm の BF-A で, スランプは, ベース 23.5cm に対して, 混入率 0.5Vol% で 18.0cm, 1.0Vol% で 12.0cm, 1.5Vol% で 8.5cm となり, いずれのケースでもファイバーボールの発生は確認されなかった。

4. 試験結果および考察

4.1 単繊維の引抜き試験

表-3 に試験結果の一覧を示す。また, 図-4, 図-5

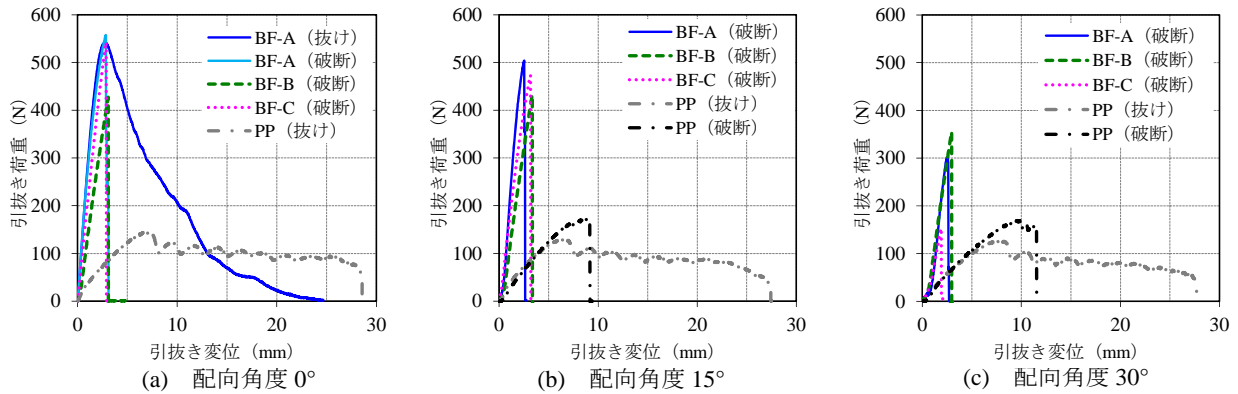


図-4 引抜き荷重-変位関係 (定着長 25mm)

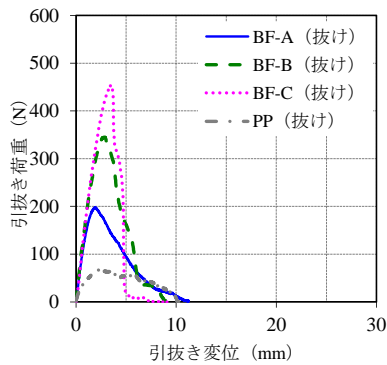


図-5 引抜き荷重-変位関係 (定着長 10mm, 配向角度 0°)

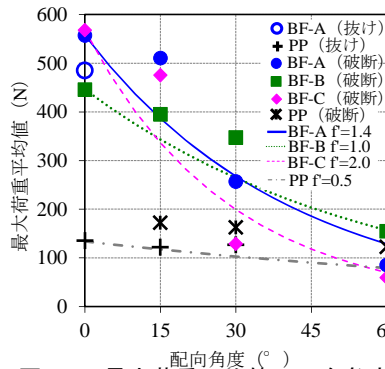


図-6 最大荷重平均値-配向角度 (定着長 25mm)

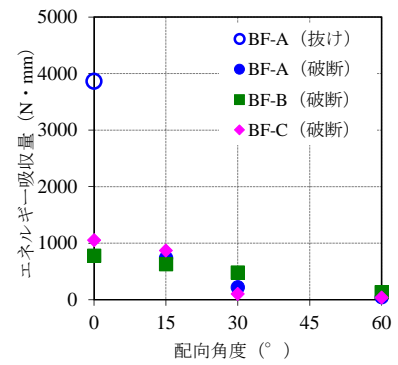


図-7 エネルギー吸収平均値-配向角度 (定着長 25mm)

に引抜き荷重と引抜き変位関係の例を示す。なお、試験結果は、5体の平均値を基本としているが、チャック不良等、測定不良であったものは除外している。

定着長 25mm のケースでは、配向角度 0°で、BF-A は変位の増加に伴って荷重がほぼ直線的に増加し、最大荷重を迎えたあとは、緩やかに引抜ける挙動を示す傾向がみられた。しかし、それ以外のケースでは、BF は、最大荷重に達した後、繊維の破断により急激に荷重が低下した。PP は、配向角度 0°、15° で最大荷重に達した後、繊維が引抜かれながら、緩やかに荷重が低下する挙動を示し、それ以外のケースでは、繊維の破断により荷重が急激に低下する傾向がみられた。一方、定着長 10mm のケースでは、いずれのケースも引抜け、荷重が緩やかに低下する挙動を示した。

図-6 に繊維の抜けまたは破断時の最大荷重と配向角度との関係を示す。BF と PP の比較において、BF は PP よりも最大荷重が大きくなったのは、BF の引張強度が PP よりも大きいことに起因するものと考えられる。BF では、BF-B が BF-A よりも小さいのは、繊維製作時の捻り加工の際に、繊維自体に損傷が生じたことなどが考えられる。また、配向角度が大きくなるにつれて、BF-C の最大荷重がより BF-A よりも小さくなったのは、BF-C が凹凸が顕著な形状であったため、引抜き時に局所的な応力が作用し破断に至ったことなどが考えられる。

図-6 より、BF は、配向角度が大きくなると破断時の

荷重が小さくなる傾向があることがわかる。繊維単体をモルタル内から引抜く本試験においては、引抜き荷重は破断時荷重よりも小さく、破断時荷重は繊維単体の最低限の力学的性能を示すものと考えられる。そこで、既往の文献⁹⁾を参考に、配向角度が繊維強度に与える影響を検討した。破断時における繊維の破断強度は、強度低減係数 f' を用いて(1)式により表わすことができる。

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^0 \cdot e^{-f' \varphi} \quad (1)$$

σ_{fu} : 破断強度(N), σ_{fu}^0 : 配向角度 0° の破断強度(N), f' : 強度低減係数, φ : 配向角度(rad)

図-6 中に(1)式を基に強度低減係数を検討し、各配向角度における繊維の強度を算出した結果を示す。なお、本試験では、PP は配向角度 0° の際に破断したケースがなかったため、図中の PP の曲線は、過去の検討結果⁹⁾を引用した。(1)式より得られた曲線と実験より得られた各配向角度における引抜き荷重を比較すると、強度低減係数 f' は、BF-A は 1.4, BF-B は 1.0, BF-C は 2.0, PP は 0.5 で概ね評価できることがわかった。強度低減係数 f' は、数値が小さい方が配向角度の影響を受けにくいことを意味し、BF は PP と比較すると、配向角度が引抜き力に及ぼす影響が大きい材料であると推測される。BF-C の値が最も大きくなったのは、配向角度が増加するにつれて、カバー糸の影響により、局所的な影響を受けやすいことに起因すると思われる。

次に BF の繊維単体の引抜き試験の結果より、引抜き時のエネルギー吸収量に関する検討を行った。図-7 にエネルギー吸収量と配向角度の関係、図-8 にエネルギー吸収量と定着長の関係を示す。なお、エネルギー吸収量とは、引抜き試験で得られた荷重-変位関係において、曲線と横軸で囲まれた面積とした。また、繊維の引抜けおよび破断の両者が確認されたケースでは、表-3 に示す引抜け本数と破断本数を比較し、本数が多い方の結果を図に示した。図-7 より、前述と同様に配向角度が大きくなると、エネルギー吸収量が小さくなる傾向にあり、これは、繊維の破断による影響と考えられる。また、図-8 より、定着長が 25mm の場合は、定着長 10mm と比較して BF-A でエネルギー吸収量が 4.2 倍となっているのに対し、BF-B、BF-C で 0.7 倍程度となっており、BF-B、BF-C は、破断の影響により、定着長が長くなってもエネルギー吸収量が小さくなる傾向にあることがわかる。これらのことから、繊維単体の破断により、エネルギー吸収量が大きく低下することがわかる。

4.2 力学的特性確認試験

(1) 圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度試験

表-4 に圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度試験結果の一覧を示す。なお、表中の括弧内の値は、短繊維を混入した際のコンクリートの試験値を、短繊維を混入しないコンクリートの試験値で除した値である（以下、圧縮強度比、静弾性係数比、割裂引張強度比）。また、試験結果は、3 体の試験体の平均値を用いている。

圧縮強度比は、繊維の形状や繊維長、混入率によらず 1.0 程度となり、いずれのケースにおいても短繊維を混入しない場合と同程度まで強度発現していることから、本実験の範囲内では、圧縮強度への影響は小さいことがわかる。

静弾性係数比は、繊維の形状や繊維長、混入率による違いは明確ではないが、0.8~1.0 程度と短繊維を混入しない場合と比較して小さくなる傾向にあった。これは、密度の小さい繊維の混入の影響などが考えられる。

図-9 に割裂引張強度比の一覧を示す。なお、図中の試験ケースについて、例えば BF-A-30-1.0 は、繊維種類が BF-A、繊維長が 30mm、繊維混入率が 1.0Vol% を意味する。割裂引張強度比は、繊維長による違いは明確ではないが、SF-40-1.0 は、BF-A~C-40-1.0 と比較すると 2 割程度大きくなっていることがわかる。また、BF を用いたケースでは、混入率の増加に伴って緩やかではあるが大きくなる傾向があることがわかる。これは繊維の弾性係数や付着強度の影響によるものと推測され、W/C=50%のコンクリートに鋼繊維、ビニロン繊維を混入して検討した既往の文献¹⁰⁾と同様の傾向となっていた。

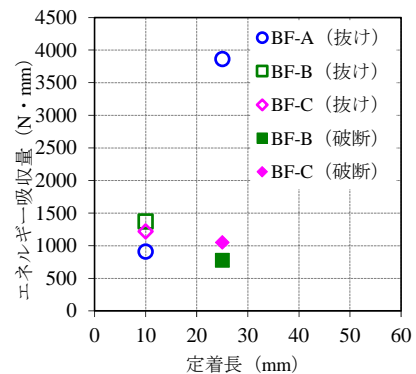


図-8 エネルギー吸収量平均値-一定着長（配向角度 0°）

表-4 圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度試験結果一覧

種類	繊維		スランプリンプ量 (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
	繊維長 (mm)	混入率 (Vol%)					
ベース	-	-	23.5	4.0	46.3 (1.00)	29.1 (1.00)	4.1 (1.00)
BF-A	30	1.0	15.5	4.9	46.4 (1.00)	26.9 (0.93)	4.3 (1.04)
		0.5	18.0	5.0	46.7 (1.01)	26.5 (0.91)	4.0 (0.99)
	40	1.0	12.0	4.8	49.1 (1.06)	26.6 (0.91)	4.2 (1.03)
		1.5	8.5	4.6	49.1 (1.06)	27.6 (0.95)	4.4 (1.09)
	50	1.0	11.5	4.6	46.1 (0.99)	29.4 (1.01)	4.3 (1.05)
BF-B	30	1.0	18.5	4.8	46.8 (1.01)	25.7 (0.89)	4.1 (1.00)
		0.5	18.5	4.5	42.5 (0.92)	24.4 (0.84)	3.9 (0.95)
	40	1.0	15.5	5.0	43.8 (0.94)	25.5 (0.88)	3.8 (0.94)
		1.5	12.5	4.2	45.2 (0.98)	24.2 (0.83)	4.0 (0.98)
	50	1.0	14.0	4.2	45.0 (0.97)	27.3 (0.94)	4.1 (1.00)
BF-C	30	1.0	17.5	5.0	47.2 (1.02)	27.2 (0.93)	3.9 (0.96)
		0.5	19.5	4.6	48.8 (1.05)	27.3 (0.94)	4.0 (0.97)
	40	1.0	13.5	4.1	47.1 (1.02)	27.4 (0.94)	3.9 (0.95)
		1.5	12.5	4.9	46.9 (1.01)	26.9 (0.93)	4.0 (0.98)
	50	1.0	14.5	4.2	44.3 (0.96)	29.6 (1.02)	4.0 (0.97)
SF	40	1.0	13.0	4.8	47.0 (1.01)	26.4 (0.91)	4.7 (1.14)
PP	30	1.0	7.0	4.0	45.7 (0.99)	26.9 (0.92)	3.9 (0.96)
	48	1.0	9.5	4.3	42.9 (0.93)	28.7 (0.99)	3.7 (0.91)

※()内の値は、強度比=繊維有の試験値/繊維無の試験値

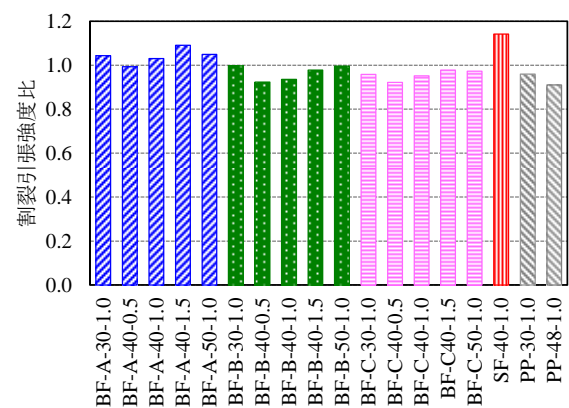


図-9 割裂引張強度比

(2) 曲げタフネス試験

表-5 に試験結果の一覧を示す。また、図-10 に繊維混入率 1.0Vol%における繊維長さとの曲げ靱性係数の関係、図-11 に繊維長 40mm (PP は、30mm を参考で記載)、繊維混入率 1.0Vol%における曲げ試験の荷重-変位関係の例を示す。なお、曲げ靱性係数は、JSCE-G 552 に準拠して(2)式により算出し、試験結果は、3 体の試験体の平均値を用いている。

表-5 曲げタフネス試験結果一覧

種類	繊維		スパン (cm)	曲げ強度 平均値 (N/mm ²)	曲げ靱性係 数平均値 (N/mm ²)
	繊維長 (mm)	混入率 (Vol%)			
ベース	—	—	23.5	6.3	—
BF-A	30	1.0	15.5	5.5	4.1
		0.5	18.0	5.0	2.5
	40	1.0	12.0	5.8	4.4
		1.5	8.5	7.7	5.8
BF-B	50	1.0	11.5	5.6	5.3
	30	1.0	18.5	5.5	2.3
		0.5	18.5	5.1	1.4
BF-C	40	1.0	15.5	5.4	2.3
		1.5	12.5	5.9	3.1
	50	1.0	14.0	5.3	1.9
		30	1.0	17.5	6.1
BF-C	40	0.5	19.5	5.5	1.2
		1.0	13.5	5.6	2.4
	1.5	12.5	5.2	3.4	
PP	30	1.0	7.0	5.9	3.9
	48	1.0	9.5	5.3	3.2

$$f_b = T_b / \delta_{ib} \cdot l / bh^2 \quad (2)$$

f_b : 曲げ靱性係数(N/mm²), T_b : 曲げタフネス(N・mm),

δ_{ib} : スパン 1/150 のたわみ, l : スパン(mm),

b : 破壊断面の幅(mm), h : 破壊断面の高さ(mm)

図-10 より, 繊維長 40mm で比較すると, BF-A は, BF-B および BF-C と比較して 2 倍程度大きくなり, SF と同程度となった。ここで, 図-11 に示した荷重-変位関係を比較すると, BF-B, BF-C は, 曲げひび割れ発生以降は, 曲げひび割れ発生荷重を上回るような荷重の回復はみられず, 変位の増加と共に荷重が低下していく傾向がみられた。一方, BF-A, SF, PP は, 曲げひび割れ発生後に一旦荷重が低下し, その後, 繊維の架橋効果により荷重が増加する傾向が確認でき, 特に BF-A については, SF と同程度の性能を有することを確認した。これは, 繊維単体の引抜き時におけるエネルギー吸収量とひび割れ面で架橋する繊維本数が関係していると推測される。そこで, 簡易ではあるが, BF シリーズについて, 試験終了後, 更に鉛直変位を増加し, 試験体を完全に破断させ, 破断面における引抜けた繊維の本数と破断した繊維の割合について検討したところ, BF-A は, BF-B と BF-C よりも引抜けた割合が高くなる傾向が見られた(表-6)。なお, 繊維の定着長および, 繊維の配向角度の影響が考えられるが, BF-A の繊維単体のエネルギー吸収量は, 定着長 10mm 時より 25mm 時が大きくなること(図-8), 配向角度が 15° 以上になると繊維が破断するため, BF-A, B, C のエネルギー吸収量に大きな差が無くなること(図-7) から, 本実験の範囲内では, 配向角度が小さく(配向角度 15° 以下), 定着長が長い繊維の挙動の影響を大きく受けることが示唆された。また, 密度から換算した 1m³あたりの繊維本数を比較すると, BF-A は, BF-B, BF-C と比較して繊維本数は, 1.1~1.3 倍程度となっている(表-6)。すなわち, BF-A は, BF-B, BF-C と

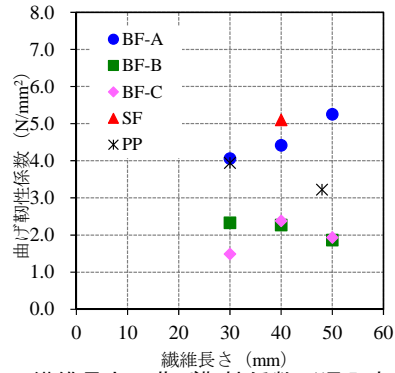


図-10 繊維長さ-曲げ靱性係数 (混入率 1.0Vol%)

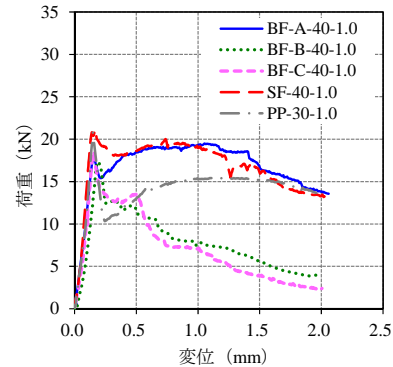


図-11 荷重-変位関係 (繊維長 40mm, 混入率 1.0Vol%)

表-6 破断面における引抜け本数と破断本数

試験ケース	破断割合 (%)	1m ³ あたりの繊維本数 (×10 ³ 本)	繊維本数比
BF-A-30-1.0	11.1	509	1.34
BF-B-30-1.0	30.3	457	1.20
BF-C-30-1.0	27.8	364	0.96
BF-A-40-1.0	12.6	381	1.00
BF-B-40-1.0	28.6	343	0.90
BF-C-40-1.0	41.8	273	0.72
BF-A-50-1.0	17.6	305	0.80
BF-B-50-1.0	30.1	274	0.72
BF-C-50-1.0	68.0	218	0.57

※破断割合 = $\frac{\text{繊維の破断本数}}{\text{試験体破断面で確認された繊維の総数}}$
 ※繊維本数 = $\frac{\text{繊維の密度}}{\text{繊維の密度から換算した繊維1本の重量}} \times \text{混入率}$
 ※繊維本数比は, BF-A-40-1.0を基準

比較して, ひび割れ面で架橋する繊維本数が多く, 繊維の引抜き挙動が卓越した(エネルギー吸収が大きい)ことから, SF と同程度の荷重-変位関係の挙動を示し, BF-A は, SF と同程度の曲げ靱性になったと考えられる。次に繊維長の違いについて比較すると, BF-A は, 曲げ靱性係数が繊維長の増大に伴い大きくなっているが, BF-B, BF-C は, 減少傾向にあることがわかる。これは, 繊維本数は, 繊維長 50mm の場合には, 30mm と比較して本数が 0.6 倍程度となるが, 4.2 節で記載したように, BF-A は, 定着長が 25mm の場合, 定着長 10mm と比較して BF-A でエネルギー吸収量が 4.2 倍となっているのに対し, BF-B, BF-C で 0.7 倍程度となっており, BF-B, BF-C は, 破断の影響により, 定着長が長くなってもエネルギー吸収量が小さくなることに起因するものと推測さ

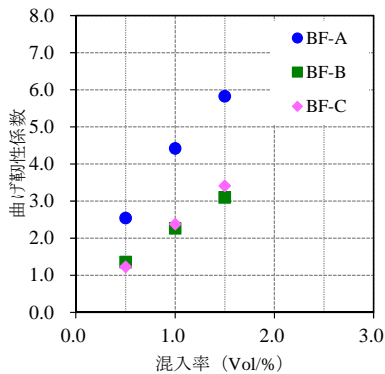


図-12 混入率-曲げ靱性係数 (繊維長 40mm)

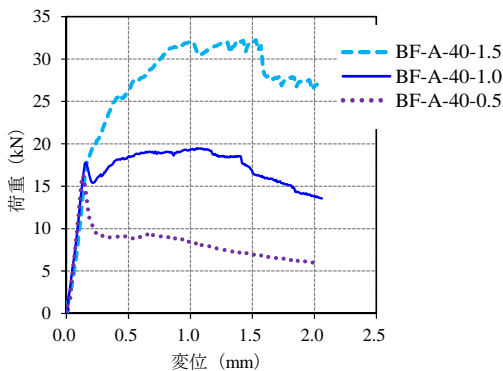


図-13 荷重-変位関係 (繊維長 40mm, BF-A)

れる。

図-12に繊維長 40mm における BF シリーズの繊維混入率と曲げ靱性係数の関係、図-13に繊維長 40mm、繊維混入率 0.5~1.5Vol% における BF-A の曲げ試験の荷重-変位関係の例を示す。図-12より、繊維の形状に係らず繊維混入率を増加させることで、曲げ靱性係数が大幅に改善しているのがわかる。また、図-13より、繊維混入率が増加すると曲げひび割れ発生以降の荷重の増加が大きくなるのがわかる。これは、繊維混入率の増加に伴い、ひび割れ面で架橋する繊維が増加し、引張力を分担しているためと推測される。しかしながら、混入率 1.5Vol% 時のスランプ値は、ファイバーボールの発生は無かったものの、ベースコンクリートと比較して著しく小さくなることから (例えば、繊維長 40mm の BF-A で、ベース 23.5cm に対して、混入率 1.5Vol% で 8.5cm。表-4 参考)、施工性を考慮すると、混入率 1.0Vol% 程度が良好に施工が可能な混入率と考えられる。

4. まとめ

本研究では、バサルト繊維を樹脂で被覆した短繊維 3 種類 (BF-A : 加工無し, BF-B : 捻り加工, BF-C : 凹凸加工) を製作し、繊維単体の引抜き性状および硬化後の力学的特性について実験的に検討した。以下に本実験の範囲内で得られた知見を示す。

(1) 引抜き試験の結果、配向角度が小さい場合、BF-A

が引抜き挙動、BF-B、BF-C は破断挙動を示し、BF-A のエネルギー吸収量が大きくなった。

- (2) 曲げタフネスは、ひび割れ面での繊維本数と繊維単体の引抜き試験時のエネルギー吸収量が関係し、繊維長 40mm、混入率 1.0Vol% で BF-A は、同一繊維長、混入率の SF と同程度となった。また、BF-A は、繊維長の増大に伴い曲げ曲げタフネスが大きくなるが、BF-B、BF-C は、減少傾向にあった。
- (3) 繊維の形状に係らず繊維混入率を増加させることで、曲げタフネスは、大きくなる傾向にあった。

謝辞：本実験を実施するに際して、竹本油脂株式会社 原田健二氏より貴重な助言を頂いた。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書，2015.8
- 2) 古谷亮ほか：鋼繊維補強コンクリートの耐腐食性状と力学性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.268-273，2014
- 3) 山口明伸ほか：紫外線による各種繊維の劣化現象の評価方法に関する基礎研究，Vol.18，No.1，pp.1161-1166，1996
- 4) 田中徹ほか：バサルト繊維補強プレート帯板接着工法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1666-1671，2012
- 5) 盛岡諒平ほか：バサルト繊維を用いた FRCC の基本特性に関する基礎的研究，土木学会第 70 回年次学術講演会，pp.1263-1264，2015
- 6) 山田高裕ほか：連続合成桁の中間支点部床版に用いる鋼繊維軽量コンクリートの長距離ポンプ圧送-阿佐千線・物部川橋梁-，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp.470-471，2000
- 7) 田中章ほか：バサルト繊維の硬化したセメント中の引抜き特性に関する基礎的検討，土木学会第 70 回年次学術講演会，pp.1265-1266，2015
- 8) 田中徹ほか：ポリプロピレン短繊維の表面加工に関する基礎研究，土木学会第 62 回年次学術講演会，pp.415-416,2007
- 9) 杉本勝哉 他：ひび割れの開口ずれを想定した単繊維引抜き試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.283-288,2013
- 10) 朴成武ほか：超高強度繊維補強コンクリートに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.331-336，2000