

論文 高アルカリ環境を考慮したバサルト短繊維補強コンクリートの引張特性に関する検討

笹田 航平*1・田中 徹*2・仁平 達也*3・井戸 康浩*4

要旨:耐アルカリ性の向上を目的として樹脂をコーティングしたバサルト短繊維の2種類(BF-VEとBF-EP)について、JISに規定された試験法などにより、繊維単体の引張強度と曲げ靱性係数から引張特性を評価した。その結果、ひび割れ抑制のために採用される鋼繊維補強コンクリートの配合、W/C=50%、繊維混入率1.0Vol.%と比較すると、BF-VEの曲げ靱性係数は供用10年程度で鋼繊維補強コンクリートの下限値程度、BF-EPは供用100年程度で平均値程度となることが推測された。併せて、切欠き曲げ試験を実施しBF-EPの、高アルカリ環境下での繊維自体の劣化や付着の劣化等を踏まえた、引張軟化曲線を提示した。

キーワード: 短繊維補強コンクリート, バサルト繊維, 耐アルカリ性, 曲げ靱性, 引張軟化

1. はじめに

短繊維補強コンクリート(普通強度、鋼繊維、混入率1.0vol.%程度)はひび割れ幅抑制等のため、鉄道用連続合成桁の負曲げ区間に適用されることがある¹⁾。鋼繊維を用いた場合、錆汁により美観を損ねることがあり、対策として有機繊維を用いることが想定される。しかし、一般に有機繊維は鋼繊維に比べてヤング係数が低く、ひび割れ幅抑制効果を期待できないことが推測される。そこで、錆汁が生じず、ヤング係数が普通強度コンクリートと概ね同程度である玄武岩由来のバサルト繊維に着目した。バサルト繊維は、他の無機繊維と同様に高アルカリイオン濃度(以下、高アルカリ)の環境下で浸食されて溶出する性質がある。これに起因して、バサルト繊維を用いた短繊維補強コンクリート(以下、バサルト短繊維補強コンクリート)においても、ひび割れ幅抑制効果が低下する可能性がある。そのため、ひび割れ抑制効果を把握するためには、短繊維がコンクリート中で使用されることを想定したうえで、短繊維補強コンクリートの性能を把握する必要があると考えられる。これに関連して、高温暴露環境下の促進試験により短繊維補強コンクリートの力学性能の経時変化に関する研究²⁾事例が報告されている。

本研究では、それ自体が耐アルカリ性の低いバサルト繊維をコーティングにより耐久性を向上させた短繊維(以下、バサルト短繊維)を開発した(2章)。次に、図-1のように、高アルカリ環境下である実環境を踏まえた促進試験を実施し、バサルト短繊維自体の引張性能の評価をJIS A 1193「コンクリート用連続繊維補強材の耐

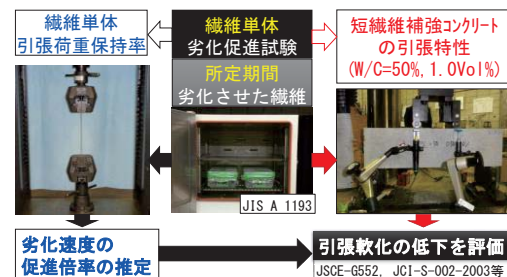


図-1 評価方法の概要

アルカリ試験方法」(以下、JIS試験法)及び魚本らの評価法³⁾を参考に実施し、曲げ靱性や引張軟化といった短繊維補強コンクリートの引張性能の評価を行った(4章)。

2. 開発したバサルト短繊維

バサルト短繊維の原料は、バサルトヤーン及びコーティング用樹脂である。使用するバサルトヤーンは、玄武岩を1500℃で熔融し、直径13μmとなるように遠心紡糸により製作されたバサルト原糸を264texとなるように束ねたものである。ここに、単位texは、繊維長さ10,000m相当の繊維の重さ(グラム)であり、繊維太さの指標である。

図-2に開発したバサルト短繊維の製作工程の概略図を示し、主な製作工程の説明を以下に示す。最初に3本のバサルトヤーンを樹脂含浸層に個別に浸して樹脂を含浸させる。次に、樹脂をコーティングしたバサルトヤーンを3本集束し、直径1mm程度の孔に通して余分な樹脂を落とす(ブッシング)。その後、5分間程度加熱して樹脂を硬化させる。これらの大きく分けて3つの工程でバサルト短繊維を製作する。

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 修士(工学) (正会員)

*2 戸田建設(株) 技術開発センター 社会基盤ユニット 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 鋼・複合構造 博士(工学) (正会員)

*4 戸田建設(株) 技術開発センター 社会基盤ユニット 社会インフラチーム 修士(工学) (正会員)

図-3 にバサルト短繊維の切断後の断面例とその模式図を示す。図-4 にバサルト短繊維の概形を示し、表-1 にバサルト短繊維の諸物性を示す。図-4 の c) には、既往の文献⁴⁾の W/C が 50%程度での曲げ靱性係数に関する検討において、市販の鋼繊維のうち値が高かった、端部がフック形状を有する鋼繊維の概形及び諸物性を併せて示す。バサルト短繊維は、次の特徴を有している。図-4 の c) の鋼繊維と概ね同等の直径程度である。バサルトヤーンを 3 本束ねたことにより表面に凹凸を有する。なお、個々の原糸を樹脂コーティングしたことにより、練混ぜ時に被覆損傷が生じた場合にも、損傷箇所以外の耐アルカリ性を保つことができるように配慮した。

コーティング材は、ビニルエステル樹脂をコーティングしたバサルト短繊維 (BF-VE)、エポキシ樹脂をコーティングしたバサルト短繊維 (BF-EP) の 2 種類とした。BF-VE の密度は 1.68g/cm³、BF-EP は 1.83g/cm³ である。平均直径や平均断面積は鋼繊維程度、BF-VE の引張強度は鋼繊維の 9 割程度であり、BF-EP は鋼繊維程度である。引張強度は、両繊維ともに鋼繊維と同程度であり、ヤング係数は、原材料がバサルト、すなわち玄武岩であることから、普通強度、普通骨材のコンクリートと同程度である。

3. 繊維単体の引張特性の評価

3.1 繊維の引張試験及び劣化の導入

アルカリによる劣化に起因して生じる繊維の引張強度低下の程度を明らかにするため、JIS 試験法に記載された高アルカリ濃度の水溶液 (B 液) に浸漬して、BF-VE、BF-EP にアルカリによる劣化を導入し、繊維単体の引張試験を実施して繊維単体の引張強度を測定した。なお、JIS 試験法では 60℃とした水溶液 (JIS-B-60℃液) のみで規定されるが、同様の水溶液を 20℃とした水溶液 (JIS-B-20℃液) についても併せて実施し、浸漬期間は、1, 2, 3, 4 週と浸漬しないものを含めて、5 水準とした。

表-2 に繊維単体の引張試験結果を示す。ここで引張荷重保持率は、アルカリ浸漬前に対する浸漬後の繊維の最大耐力比である。引張試験では、両繊維ともに最大荷重時に破断に至り、引張荷重保持率は、BF-VE の浸漬 4 週 20℃で 65.9%、60℃で 10.5%となり、BF-EP の浸漬 4 週 20℃で 96.1%、60℃で 58.1%となった。

図-5 に JIS 試験前後に確認した繊維の表面状況の例を示す。コーティングされた繊維表面からアルカリ水溶液が浸食し、茶色の原糸が露出し溶解していることが分かる。図-5 b), c) に促進試験 4 週後の表面状況を拡大した画像を示す。限定された範囲であるが、b) にみられる原糸の露出が c) にはみられず、BF-VE と BF-EP の表面のコーティング状態に差異がみられた。

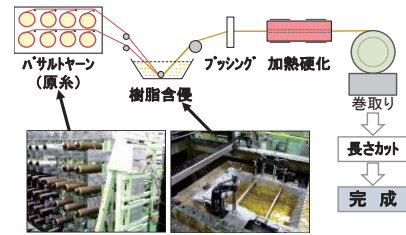
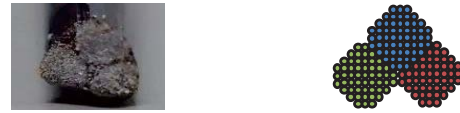


図-2 開発した繊維の製造方法



a) 切断後の断面例 (BF-EP) b) 模式図 (BF-VE, BF-EP 共通)
図-3 開発繊維の断面



図-4 開発した短繊維及び鋼繊維 (繊維長 40mm)

表-1 開発した短繊維及び鋼繊維の諸性質

	密度 (g/cm ³)	平均直径 (mm)	平均断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
BF-VE	1.68	0.91	0.65	883	30.1
BF-EP	1.83	0.95	0.71	1103	27.1
鋼繊維	7.85	0.87	0.65	1070	200

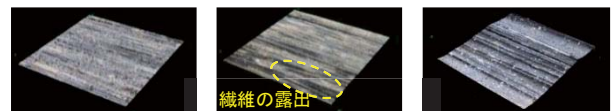
※平均直径：断面積から等価な円断面として換算

表-2 繊維単体の引張試験結果

項目	温度 (℃)	浸漬期間ごとの溶液 pH 及び最大引張荷重 (N)				
		浸漬 0 週	浸漬 1 週	浸漬 2 週	浸漬 3 週	浸漬 4 週
浸漬溶液の pH	20	13.8	13.1	13.0	13.1	13.2
	60	13.8	13.1	13.0	13.2	13.2
BF-VE の 最大引張荷重	20	554 (-)	518 (93.5)	496 (89.5)	386 (69.7)	354 (65.9)
	60	554 (-)	171 (30.5)	121 (21.8)	75 (23.5)	58 (10.5)
BF-EP の 最大引張荷重	20	739 (-)	733 (99.2)	719 (97.3)	734 (99.3)	710 (96.1)
	60	739 (-)	526 (71.2)	719 (63.6)	466 (63.1)	429 (58.1)

※浸漬溶液の pH の平均値：13.25, JIS A 1193 B 液相当

※括弧内 0 週からの引張荷重保持率 (%)



a) BF-VE (試験前) b) BF-VE (浸漬 4 週) c) BF-EP (浸漬 4 週)
図-5 促進試験前後の繊維表面例 (拡大倍率 400 倍, 浸漬 JIS A 1193 B 液相当, 温度 60℃)

3.2 浸漬期間と供用期間の換算方法

魚本らの評価法は、図-6 に示すように、繊維断面を円形としアルカリ水溶液が均等に浸食すると仮定して、フィックの拡散方程式を簡略化した式(4)を用いることが特徴である。式(4)において、浸漬される水溶液のアルカリイオン濃度の影響は陽な形で考慮され、温度の影響は反応速度を示す拡散係数(k)の差異として陰な形で考慮されている。そこで、温度の影響を試験により明らかにすれば、浸漬期間と供用期間が換算できるようになると考えられる。

$$dy/dx = k C / x \quad (1)$$

$$x = \sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = P_t/S_0 = P_t/S_t \quad (3)$$

$$\sigma_t = P_t/S_0 = P_t/S_t \cdot \sigma_0 = (1 - \sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t / R_0})^2 \cdot \sigma_0 \quad (4)$$

ここに、 σ_0 ：浸漬前の繊維引張強度 (N/mm²)、 σ_t ：t 時間浸漬の繊維の引張強度 (N/mm²)、 P_0 ：浸漬前の引張破断荷重 (N)、 P_t ：t 時間浸漬の引張破断荷重 (N)、 S_0 ：浸漬前の繊維引張強度 (mm²)、 S_t ：t 時間浸漬の繊維引張強度 (mm²)、 R_0 ：浸漬前の繊維半径 (mm)、 C ：アルカリイオン濃度 (mol/L)、 k ：拡散係数 (mm²/hr)である。

適用の前提として、バサルト短繊維のように樹脂コーティングされた繊維の場合にも同様に、表面から繊維が浸食されていることから、魚本らの評価法が適用可能であると考えられる。したがって、試験により、式(4)の拡散係数(k)を求めることで、温度差及びアルカリイオン濃度差による劣化速度を評価することとした。

図-7 に温度ごとの繊維の引張強度保持率と浸漬期間(促進期間)の関係を示す。また、式(4)に基づき、試験結果を最小二乗法により算定した拡散係数(k)を凡例中に示す。BF-VE に比べて BF-EP が浸食されにくく、BF-VE に対して BF-EP の拡散係数(k)は、20℃で 1/95 倍程度、60℃で 1/7 倍程度の結果となっている。

図-8 に繊維の引張強度保持率と推定供用期間の関係を示す。温度 20℃及び 60℃の温度差による促進倍率は、拡散係数(k)の比となるため、BF-VE で 27.0 倍、BF-EP で 348.2 倍となる。また、文献³⁾と同様に、コンクリート内部の環境は pH=12.7 とするとアルカリイオン濃度の差異による促進倍率 ($10^{pH} \cdot 10^{13.25} / 10^{12.70}$) ≈ 3.6 倍であると算定される。すなわち、JIS 試験による繊維の劣化は、BF-VE が約 10 年、BF-EP で約 100 年、供用に相当すると評価された。

4. 短繊維補強コンクリートの引張特性の評価

4.1 概要

割裂引張強度試験 (JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」)、曲げタフネス試験 (JSCE-G552「鋼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」)、及び切欠き曲げ試験 (JCI-S-002-2003「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」)を実施した。各試験に用いた供試体は、3章と同様にアルカリによる劣化を導入した BF-VE、BF-EP を混入し、長期間供用されて劣化した状態を模擬した。なお、JSCE-F554-1999「鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維混入率試験方法」の洗い分析試験方法を参考に、練混ぜ後にバサルト繊維補強コンクリートの一部から繊維を洗い出して、混練りによる繊維の折れや破断はほとんどないことを確認している。本検討は、短繊維を一定期間、高温・高アルカリ環境下に配置した後にコンクリートに混入し

ている。これは、コンクリートに練混ぜる実現象と環境と異なるが、繊維自体の劣化に着目することを目的に実施している。短繊維補強コンクリートの配合は、実際に鉄道構造物の連続桁負曲げ区間に適用された配合⁴⁾を参考に、W/C=50%、繊維混入率 1.0Vol.%とした。なお、各試験時の材齢は、約 4 週で、繊維混入率は促進劣化前の繊維重量から算出した。

4.2 割裂引張強度の検討

表-3 に供試体に用いたバサルト短繊維補強コンクリートの強度を示す。割裂引張強度は、コンクリートの性能を評価する代表的な指標であると考え、各繊維が強度に与える影響について検討するために測定した。無浸漬時に対して 2 週浸漬時の割裂引張強度は、BF-VE では同等、BF-EP では 2 割程度減少し、無浸漬時に対して 4 週浸漬時の割裂引張強度では BF-VE、BF-EP ともに 1 割程度低い。なお、参考として示した圧縮強度は、浸漬期間によらず概ね同等であった。静弾性係数は、BF-EP の 2 週浸漬時を除き、浸漬期間によらず概ね同等であるが、

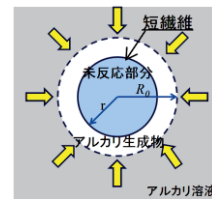


図-6 アルカリ反応モデル³⁾

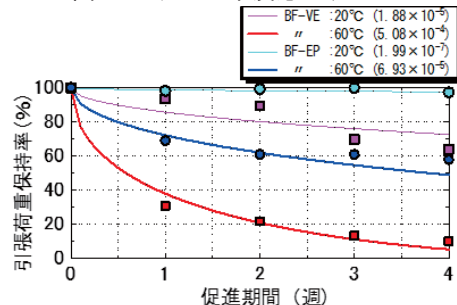


図-7 繊維単体の強度残存率 (k=拡散係数)

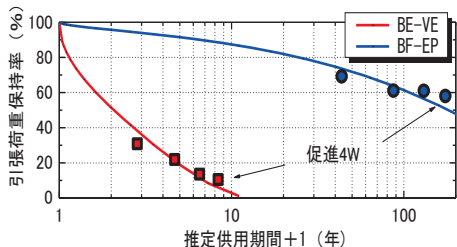


図-8 引張荷重保持率と推定供用期間の関係

表-3 供試体に用いたバサルト短繊維補強コンクリートの強度

繊維	浸漬期間	割裂引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
無混入	—	4.05	49.6	30.0
BF-VE	無浸漬	3.87	47.5	34.0
	2週浸漬	3.99	45.6	34.3
	4週浸漬	3.66	46.4	34.7
BF-EP	無浸漬	4.44	51.5	31.0
	2週浸漬	3.69	49.6	28.3
	4週浸漬	3.89	49.4	30.4

BF-EPの2週浸漬時のみ1割程度低くなった。また、繊維の混入がないコンクリート4週浸漬後の値を比較した場合、割裂引張強度に大きな差異はみられなかった。

4.3 曲げ靱性係数の検討

(1) 曲げタフネス試験

試験は、JSCE-G552「鋼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」を参考に曲げ試験（以下、切欠き曲げ試験）を実施した。繊維長が40mmであることから、試験には100×100×400mmの角柱供試体を用いており、試験数は5体とし、荷重時の計測項目は荷重及びたわみとした。

(2) 荷重-変位の関係

図-9に曲げタフネス試験の荷重-変位関係及びひび割れ界面に露出した繊維の破断率を示す。

BF-VE（無浸漬）、BF-EP（無浸漬）を比較すると、無浸漬の平均曲線の形状は概ね同様であった。ひび割れ発生による荷重低下、ひび割れ架橋効果による荷重の再増加（二次的な荷重増加）、緩やかに荷重低下する挙動となった。BF-VE（無浸漬、2週浸漬、4週浸漬）を比較すると、二次的な荷重増加に荷重の最大点（以下、2次ピーク）が、BF-VE（2週浸漬）、BF-VE（4週浸漬）で明確ではなくなった。また、2次ピーク後（2次ピークが明確でない場合には、ひび割れ発生荷重）の荷重低下勾配は、浸漬期間の長期化に伴って増加する傾向があった。BF-EP（無浸漬、2週浸漬、4週浸漬）を比較すると、すべて2次ピークが生じ、ひび割れ発生荷重程度まで増加した。2次ピーク後の荷重低下勾配は、浸漬期間の長期化に伴って増加する傾向があるものの、BF-VEの傾向と比べて弱い。また、試験後に強制的に押し切って、ひび割れ界面を露出させて、BF-VE、BF-EPの繊維破断率を確認した。定性的な検討ではあるが、両繊維ともに浸漬期間の長期化に伴って増加する傾向がみられ、BF-VEと比べてBF-EPの繊維破断率が低い傾向となった。2次ピークの荷重値や2次ピーク後の荷重低下勾配は、繊維破断率や繊維とコンクリートの付着（以下、繊維付着）が影響し

ていると推察される。そこで、BF-VEでは繊維破断率の増加及び繊維付着の低下がともに影響し、BF-EPでは、繊維付着の低下がより支配的な要因であると考えられる。

(3) 曲げ靱性係数

表-4に算定したバサル短繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数を示す。また、図-10に曲げ靱性係数と曲げ強度の関係を示す。比較対象として、市販の鋼繊維を用いた短繊維補強コンクリート（圧縮強度39～54N/mm²、繊維混入率1.0vol.%程度、繊維直径0.80mm程度、繊維長30～60mm）の曲げ靱性係数⁴⁾を示す。曲げタフネス試験の荷重-変位関係の差異を定量的に比較するため、曲げ靱性係数を算出した。曲げ靱性係数は、BF-VEの浸漬前は5.09 N/mm²、浸漬4週は1.92 N/mm²、浸漬4週で鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数の下限値程度となった。BF-EPの浸漬前は5.59 N/mm²、浸漬4週は4.22 N/mm²となり、浸漬4週で鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数の平均値程度となった。以上より、3章の検討を踏まえると、BF-VEの曲げ靱性係数は、供用10年程度で鋼繊維補強コンクリートの下限値程度となり、BF-EPのそれは、BF-VEに比べ耐アルカリ性に優れ、供用100年程度で鋼繊維補強コンクリートの平均値程度となる評価結果となった。

4.4 引張軟化の検討

(1) 切欠き曲げ試験

JCI-S-002-2003「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」を参考に切欠きのある供試体の曲げ試験を実施した。切欠き曲げ試験に用いる供試体の支間中央部に深さ30mmのリガメント（切欠き）を設けた。試験数は5体を基本とし、浸漬0週のみ4体である。曲げ試験方法は、UFC指針⁵⁾の参考資料とは異なり、支間中央の集中荷重とした静的な3点曲げ荷重試験である。計測項目は、荷重荷重及びひび割れ肩口開口変位である。肩口開口変位は、容量5mmのクリップ型変位計を用いて計測した。なお、荷重-肩口開口変位の平均曲線は、それぞれ4または5体の試験うち、肩口開

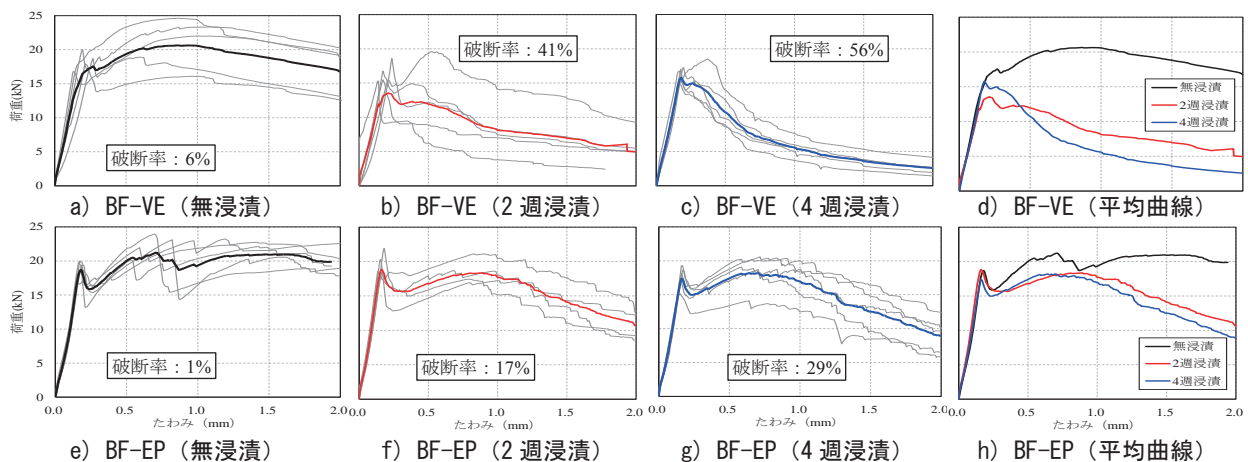


図-9 荷重-たわみ関係

口変位が 5mm までの破壊エネルギーが中央値に最も近い 3 体を用いて作成した。

(2) 荷重-肩口開口変位の関係

図-11 に切欠き曲げ試験の荷重-肩口開口変位関係を示す。図-11 d), h) には、平均化した荷重-肩口開口変位関係を示しており、その図中には 2 次ピーク時点と 2 次ピークから変位が勾配の変化があまり認められない範囲として 2mm 増加した点の割線の勾配を示す直線も併せて示す。また、表-5 に荷重-変位関係の各段階における荷重値を示す。BF-VE, BF-EP を比較すると、無浸漬の平均曲線の形状は概ね同様であった。ひび割れ発生による荷重低下、ひび割れ架橋効果による荷重の再増加(2 次的な荷重増加)、緩やかに荷重低下する挙動となった。BF-VE では、2 週浸漬では、ひび割れ発生による荷重低下後の 2 次的な荷重増加量が減少し、4 週浸漬すると 2 次的な荷重増加しない形状となった。また、2 次的な荷重増加後の低下は、長期浸漬したものほど、急な低下勾配となった。これらは、繊維の引張強度が低下して破断率が増加したことやアルカリ浸漬によって繊維付着耐力に低下したことが推察される。BF-EP では、2 週、4 週浸漬ともに、ひび割れ発生による荷重低下後に 2 次的な荷重の増加が生じ、その後に緩やかな荷重低下する挙動となった。2 次的な荷重増加の最大値も無浸漬、2 週、4 週浸漬で概ね同等であった。また、2 次的な荷重増加後の低下については、BF-VE と同様に長期浸漬したものほど急な低下勾配となる傾向であった。2 次的な荷重増加の最大点において、荷重値に繊維の劣化の影響がわずかで肩口開口変位のみ増加したのは、主として繊維の破断よりも繊維付着耐力の低下に起因したものと推察される。これは、4.3 の推察とも一致するものである。また、2 次的な荷重増加後の低下も、長期浸漬したものほど、急な低下勾配となった。BF-VE の挙動と比較すると、繊維付着耐力の低下によって、荷重低下勾配が生じたことが推察される。つまり、BF-EP は、繊維付着耐力

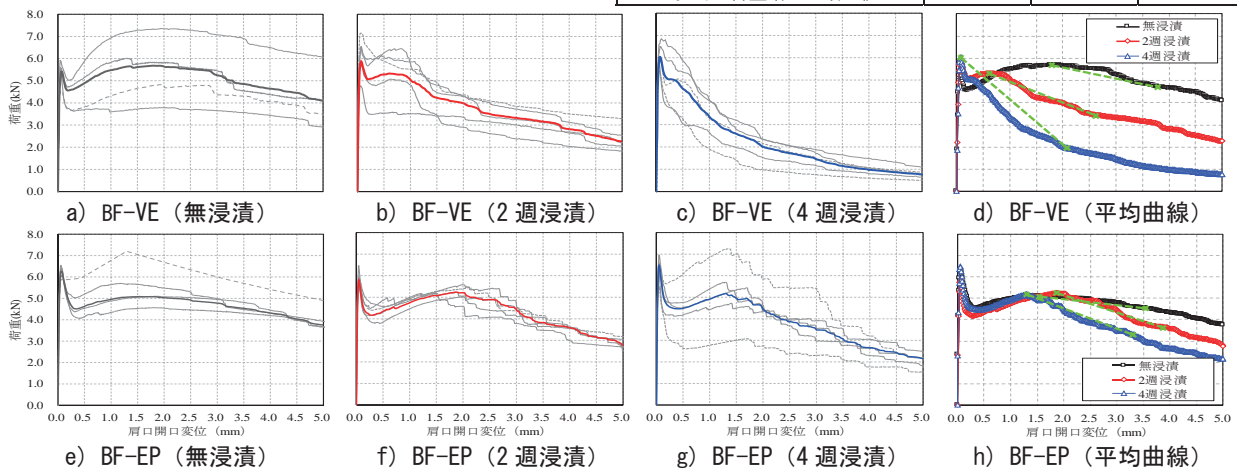


図-11 荷重-肩口開口変位関係

が低下して、繊維が破断する前にコンクリートから引抜けるような破壊挙動(以下、引抜け挙動)が支配的となっていることが推察される。

(3) BF-EP の引張軟化曲線

図-11 より、各繊維で荷重-肩口開口変位の関係が異なることが分かった。本節では、繊維の劣化にかかわらず引抜け挙動が支配的となっていると考えられた BF-EP について、切欠き曲げ試験の結果(図-11)を用いて、引張軟化曲線の推定(以下、逆解析)を実施した。逆解析には、コンクリート工学会が提供する多直線近似解析プログラムを用いた。なお、プログラム上で設定できる許容誤差は既往の文献⁹⁾を参考に 3%程度までとした。

図-12 に逆解析の結果を示す。無浸漬、2 週浸漬、4 週浸漬のすべての引張軟化曲線において、共通して次のような傾向がみられた。引張応力は、仮想ひび割れ幅の増加に伴い、逆解析における初期応力値である初期結合応力から応力が 1.5 N/mm²程度になるまで低下し、その後、概ね一定となった。これは、仮想ひび割れ幅の増加に伴って繊維がひび割れ界面を架橋して引張力(内力)に抵抗していることを表現しているものと推察される。仮想ひび割れ幅がさらに増加すると、緩やかに応力低下した。これは、引張力に抵抗していた繊維がひび割れ幅

表-4 曲げ靱性係数

	曲げ靱性係数 (N/mm ²)		
	無浸漬	2 週浸漬	4 週浸漬
BF-VE	5.09	2.54	1.92
BF-EP	5.59	4.42	4.22

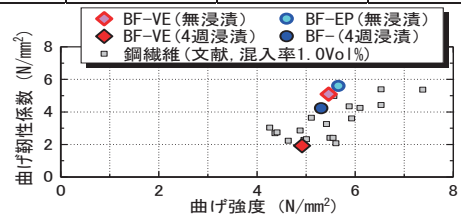


図-10 曲げ靱性係数と曲げ強度の関係

表-5 荷重-変位関係の各段階における荷重値

段階	荷重値(kN)		
	無浸漬	2 週浸漬	4 週浸漬
ひび割れ発生時	6.29	5.80	6.49
2 次的な荷重増加の最大値	5.08	5.24	5.17

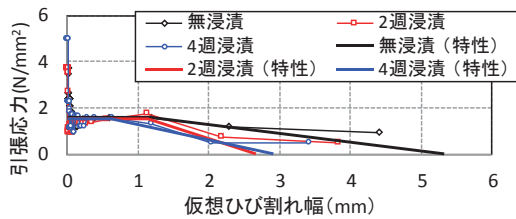


図-12 高アルカリ環境を考慮したBF-EPの引張軟化曲線

表-6 BF-EPの引張軟化曲線の諸数値

	平坦部の引張応力 (引張強度)	平坦部の 終点幅 w1	引張応力0点 幅 w2
	(N/mm ²)	(mm)	(mm)
無浸漬	1.56	1.18	5.33
2週浸漬	1.56	1.13	2.65
4週浸漬	1.56	0.63	2.91

の増加に伴い引抜けつつ抵抗していたが、引張力を保持できなくなったことを表現していると推察され、(2)で考察した引抜け挙動が支配的であることも整合する。

また、引張応力を保持し、仮想ひび割れ幅が増加する範囲（平坦部）から引抜け挙動により引張応力が低下し始めるときの仮想ひび割れ幅（平坦部の終点幅 w1）は、無浸漬と2週浸漬で約1.2mm、約1.1mmであるのに対し、4週浸漬で約0.6mmとなった。平坦部の終点幅（w1）以降の引張応力の低下勾配は、無浸漬に比べて、2週浸漬と4週浸漬の値が増加して急となった。以上のことから、高アルカリ環境で繊維に劣化を生じた場合には、引抜け挙動により引張応力が低下し始めるときの仮想ひび割れ幅（平坦部の終点幅 w1）が減少し、それ以後の引張応力の低下も急勾配となる結果であった。

そこで、引張軟化曲線及び本項の考察を踏まえて、引張軟化曲線を構築することを試みた。これは、短繊維補強コンクリートの性能の評価するためには、短繊維の時間経過に伴う性能の変化を考慮し、時間軸を踏まえた性能評価が必要であると考えためである。表-6に浸漬を考慮した引張軟化曲線を示す。引張応力は、エネルギー吸収の観点から、逆解析した引張軟化曲線の仮想ひび割れ幅：0～w1の範囲の平均応力とした。また、引張応力0となるときの仮想ひび割れ幅は、w1以降の引張軟化曲線と横軸がなす面積が同一となる台形形状を仮定し、平坦部の終点を通る引張応力低下の直線を決定して、横軸と交わる点をw2とした。平坦部終点幅（w1）は逆解析から得られた値を用いた。なお、引張応力0点幅（w2）の算出には、図-11における仮想ひび割れ幅の最大点は除外した。

5. まとめ

本研究の内容及び本研究の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

(1) バサルト繊維を既往の文献⁴⁾のW/Cが50%程度での曲げ靱性係数に関する検討において、その値が高か

った鋼繊維と概ね同等の直径となるように集束し、ビニルエステル樹脂やエポキシ樹脂をコーティングし、耐アルカリ性を向上させたコンクリート補強用の短繊維を開発した。JIS試験法により劣化を導入したバサルト短繊維の引張試験を行い、BF-VEの4週浸漬後の引張強度は、浸漬前の10%程度、BF-EPの4週浸漬後で60%程度となった。

- (2) 長期間供用され繊維が劣化した状態を模擬するため、高温・高アルカリ環境下（JIS試験法）で促進劣化させたバサルト繊維を混入した短繊維補強コンクリート（W/C=50%、繊維混入率 1.0Vol.%）の曲げ靱性係数、魚本らの評価法を参考に評価した繊維の劣化程度から、BF-VEの曲げ靱性係数は、供用10年程度で鋼繊維補強コンクリートの下限値程度となり、BF-EPでは、供用100年程度で鋼繊維補強コンクリートの平均値程度となる評価結果となった。
- (3) (2)と同様の条件で実施したバサルト短繊維補強コンクリートの切欠き曲げ試験の荷重-肩口開口変位関係より、BF-VEでは、繊維破産率の増加と付着耐力の低下の影響により、ひび割れ発生後のピーク時の荷重及び肩口開口変位が減少した。一方で、BF-EPでは、BF-EPと比べ繊維破断率は低く、付着耐力の低下が支配的であった影響により、ひび割れ発生後のピーク時の肩口開口変位のみ減少するような傾向となった。この傾向と逆解析の結果を踏まえて、高アルカリ環境を考慮した引張軟化特性を提示した。

参考文献

- 1) 保坂鐵矢, 山田高裕, 中野幹一郎: 鋼繊維軽量コンクリートを用いた連続合成鉄道橋 阿佐線・物部川橋りょう, コンクリート工学, Vol.38, No.6, pp.24-30, 2000
- 2) 保倉篤, 宮里心一, 岡村脩平, 吉本大士: アラミド製短繊維補強コンクリートの力学性能に関する高温暴露試験による長期耐久性評価, 第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 2017
- 3) 魚本健人, 勝木太: 各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.490, V-23, 1994
- 4) 徳富恭彦, 南邦明, 斉藤雅充, 下津達也: 鋼鉄道橋連続合成桁で用いる鋼繊維補強コンクリートの性能特性, 土木学会第67回年次学術講演会, I-454, 2012
- 5) 土木学会コンクリート委員会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー, No.113, 2004
- 6) 栗原哲彦・安藤貴宏・国枝稔・内田裕市・六郷恵哲: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996.2