

バサルト繊維を用いた繊維補強モルタル (FRCC) の特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON PROPERTIES OF FRCC BY BASALT FIBER

構造及びコンクリート工学分野 藤原 資也
Structure and Concrete Tomoya FUJIWARA

新たなコンクリート用短繊維として、優れた引張強度、耐熱性を有するバサルト繊維が注目されている。本研究では、バサルト繊維を FRCC に適用した際の硬化性状やフレッシュ性状に及ぼす影響を把握した上で、剥落抵抗性の評価として、曲げ靱性試験を実施した。その結果、バサルト繊維により曲げ強度上昇効果ならびにひび割れ抑制効果が期待できることが分かった。また、靱性能の向上のため、繊維の付着面積を増加させ、付着強度の上昇を図る必要があることが分かった。

As new short fiber for concrete, it is attracted attention that basalt fiber possesses high tensile strength and heat resistance. In this study, it was grasped the influence that basalt fiber exerts on the curing properties of the mortar and the fresh mortar properties, and the flexural toughness test was put into effect for the purpose of evaluation the spalling preventive effect. As a result it was found that FRCC by basalt fiber has improving the strength bending and crack suppressing effect. And, in order to improve flexural toughness, it was found that bond strength between the mortar and the fiber should be raised by increasing the surface area of the fiber.

1. はじめに

社会資本の多くを占めているコンクリート構造物の高齢化への維持管理・更新に対して、既存の施設の長寿命化を図ることで将来にわたる維持管理費用の削減が求められている¹⁾。コンクリート構造物の使用状態での耐久性を向上させる方法の一つとして、コンクリート材料に短繊維を混入することで、繊維の架橋効果によりコンクリート材料の引張性能を大きく改善させる繊維補強セメント複合材料（以下、FRCC）に注目が集まっている。FRCC はひび割れ抑制や剥落防止、補強など期待する性能によって、使用する繊維の特性も様々であり、コンクリート用短繊維として、PP 繊維が規格化されたことで、今後、更にコンクリート用短繊維の研究開発が進んでいくものと考えられる。

本研究室では新たなコンクリート用短繊維として、バサルト繊維に着目した。バサルト繊維は玄武岩から製造され、繊維自身は鋼繊維と同等以上の優れた引張強度、耐熱性を有する無機繊維である（表-1）。バサルト繊維の土木分野での適用として、プレートとして加工され、その効果について検討されている研究例²⁾はあるが、バサルト短繊維を用いた FRCC について、研究されている例は極めて少なく、その際の特性は明らかになっていない³⁾。また、開発段階の繊維であるため、適切な繊維の形状の検討も行われていないのが

現状である。

そこで、本研究では、バサルト繊維を用いた FRCC の実用化に向け、バサルト繊維を FRCC に適用した際のフレッシュ性状や硬化性状などの基本特性の把握を行った。また、使用時における強度特性および剥落抵抗性評価試験結果から、今後の繊維の開発に向けた提言を行った。

表-1 各繊維の物性値例

繊維種	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)
バサルト	3840~4840	91~110	2.63
鋼	2000~	200	7.85
耐アルカリガラス	1500	74	2.8
PP	530	5	0.91
PVA	1600	40	1.3

2. フレッシュ性状および硬化性状

2.1 基本特性試験

本試験では、フレッシュ性状、圧縮強度、曲げ強度の基本特性の把握を行った。パラメータは繊維種とし、それぞれ繊維径-繊維長や繊維の集束状態がことなるバサルト繊維3種に加え、PVA 繊維、繊維無の5種とした（表-2）。なお、B11-3、B15-12、V40-12 は練混ぜ時に繊維がほぐれる繊維（以下、解織型繊維）であり、Btwi-12 は練混ぜ時において繊維が集束した状態

の繊維（以下、集束型繊維）である。配合および使用材料については既往研究⁴⁾に示されているPVA繊維を用いたDFRCCの配合を参考にし、繊維混入率は0.5%、0.75%、1.0%とした（表-3）。試験方法に関してはモルタルフロー試験および圧縮強度試験、曲げ強度試験を実施した。試験方法はJIS R 5201に準じて行い、強度試験用供試体は40×40×160mmの曲げ供試体を各パラメータで3体ずつを作成し、スパン100mmの3点曲げ試験後の試験片2体で圧縮試験を実施し、その平均値を圧縮強度とした。

図-1にモルタルフロー値-繊維混入率関係を示す。解繊型繊維であるV40-12、B11-3、B15-12に関しては繊維混入率の増加とともにフロー値の低下が見られる。特にバサルト繊維を使用したB11-3、B15-12は極端に悪化した。B11-3、B15-12に使用した繊維径が細すぎたことで、モルタルと接する繊維の比表面積が上昇し、モルタルの粘性を極端に向上したと考えられる。集束型繊維であるBtwi-12は繊維の混入によるフローの低下が見られなかったことから繊維の特性ではなく混入繊維の合計比表面積が影響していると推察される。

図-2に圧縮強度（平均値）-繊維混入率関係を示す。圧縮強度に関して繊維混入率0.75%以上でB15-12がNに比べ、10N/mm²以上低下している。充填率の低下が圧縮強度に影響を及ぼしたと考えられたがフロー値が同程度であったB11-3はそれほど低下していない。これはファイバーボールが影響していると考えられる。アスペクト比の大きい繊維はファイバーボールを形成しやすくなり、より大きなファイバーボールとなる。つまり、強度低下に影響する因子が大きくなり、強度低下に至ったと考えられる。

図-3に曲げ強度（平均値）-繊維混入率関係を示す。V40-12は繊維の破断によって破壊し、繊維の性能を最大限活かしているが、B11-3、B15-12、Btwi-12は繊維の引き抜けによって、破壊しており、バサルト繊維の有意な引張強度を活かしきれておらず、付着強度の上昇によって、更なる強度増分が期待できる。B11-3とB15-12を比較すると、B15-12の強度が大きく、破壊形式から繊維一本当たりの付着面積が強度に影響を及ぼしたと推測できるが、供試体厚が繊維長に対して、小さいことで繊維の配向性に違いが生じた可能性も否定できないため、供試体寸法を変更して再度検討する必要がある。Btwi-12に関しては0.5%においては強度の上昇が見られるが、繊維混入率による上昇は見られない。これは繊維混入数が少なく、破断面内に存在する繊維本数にばらつきが大きくなったことによるものと推察でき、これは目視にて確認されている。よって、フロー値に影響を及ぼさないことから更に繊維混入率を増加させることで更なる強度の上昇が見込まれる。

表-2 パラメータ

供試体名	使用繊維	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)	アスペクト比	練混ぜ時の 繊維束の状態
N	—	—	—	—	—
V40-12	PVA	40	12	300	解繊
B11-3	バサルト	11	3	273	解繊
B15-12		15	12	800	解繊
Btwi-12		—	12	—	集束(撚り合わせ)

供試体名：○□△ → ○：繊維種、□：繊維径（繊維形状）、△：繊維長

表-3 配合

供試体名	繊維混入率 (%)	単位量(kg/m ³)								
		水 W	普通セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	繊維	高性能AE減水剤 SP	増粘剤 VA	消泡剤 EB	
N	0	467	831	208	415	0.0	2.55	0.4	0.82	
V40-12	0.50	465	827	207	413	6.5	2.54	0.4	0.82	
	0.75	463	825	206	412	9.8	2.54	0.4	0.82	
	1.00	462	823	206	411	13.0	2.53	0.4	0.82	
B11-3	0.50	465	827	207	413	13.2	2.54	0.4	0.82	
B15-12	0.75	463	825	206	412	19.7	2.54	0.4	0.82	
Btwi-12	1.00	462	823	206	411	26.3	2.53	0.4	0.82	

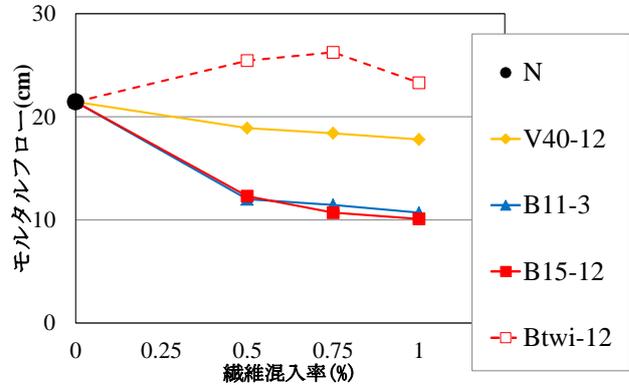


図-1 モルタルフロー値-繊維混入率関係

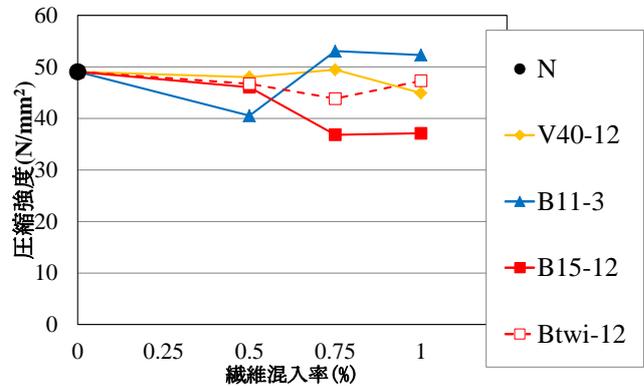


図-2 圧縮強度（平均値）-繊維混入率関係

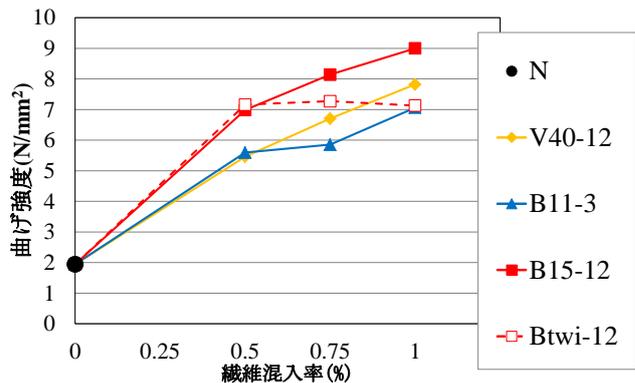


図-3 曲げ強度（平均値）-繊維混入率関係

表-4 基本特性 (平均値)

供試体名	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	曲げ強度 (N/mm ²)
N	71.3	0	47.3	17.8	0.25	2.59
B11-3	41	0.9	47.1	18.1	0.24	4.35
B15-12	46.5	1.2	44.0	17.2	0.24	4.79

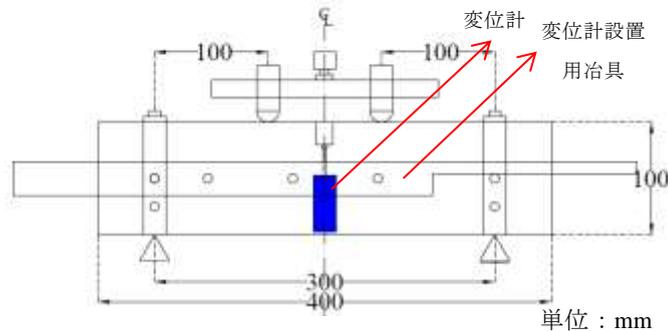


図-4 3等分曲げ試験

2.2 靱性評価試験

本試験ではバサルト繊維 FRCC の靱性の評価を行った。パラメータは N, B11-3, B15-12 の 3 種とし、繊維混入率は 1.0% とした。使用繊維および配合に関して、基本特性試験と同様であるが、フレッシュ性状の向上のため、高性能 AE 減水剤を 2 倍量とした。曲げ強度における配向性の影響を考慮し、曲げ試験体寸法を 100×100×400mm とした。曲げ試験方法に関しては JCI SF4 に示される曲げタフネス試験方法に準拠し、3 等分曲げ載荷とし、計測項目は荷重および図-4 に示すスパン中央変位を測定し、荷重-変位関係からスパン 1/150 たわみまでの曲げタフネスを求め、曲げ靱性係数を算出した。基本特性試験として、JIS R 1150, JIS A 1128, JIS A 1108 に準拠し、スランプフロー試験、空気量試験、圧縮強度試験を行い、圧縮強度試験では弾性係数およびポアソン比の計測も行った。

表-4 に基本特性試験結果を示す。高性能 AE 減水剤量を 2 倍量に増やしてもスランプフローに関しては高流動コンクリートの目標フロー値 (55cm~75cm) を満たすことはできず、フレッシュ性状の改善に関しては、配合の検討が必要であると言える。圧縮特性に関しては B15-12 のみファイバボールの形成による影響と思われる圧縮強度の低下が見られたが、弾性係数およびポアソン比の違いは見られず、繊維の種類による圧縮特性への影響は小さいと考えられる。曲げ強度に関して、供試体寸法を大きくしても、繊維の付着面積の大きい B15-12 の強度が大きくなっていることから繊維の付着面積を大きくすることで、曲げ強度は上昇することが明らかとなった。

靱性の評価に関して、図-5 に曲げタフネス試験結果から算出した曲げ靱性係数を示す。曲げ靱性係数が高い程、靱性能が高いことを示す。図-5 を見ると、靱性能においても B15-12 の方が高いことがわかる。こ

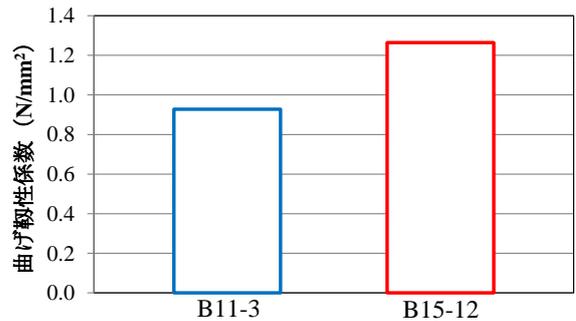


図-5 曲げ靱性係数 (平均値)

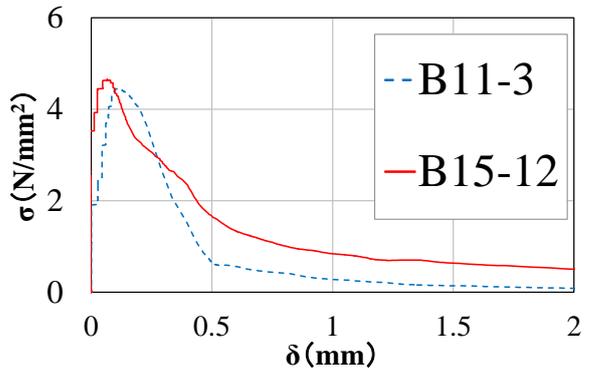


図-6 曲げ応力-変位関係 (一例)

表-5 提案配合

水/結合材 W/B (%)	細骨材/結合材 S/B (%)	FA置換率 FA/B (%)	SP添加率 SP/B (%)	繊維混入率 (%)
38	20	31	1.5	1.0

単位量(kg/m ³)						
水 W	早強セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	繊維 バサルト	高性能AE減水剤 SP	消泡材 EB
451	819	368	237	26.3	17.8	0.82

の理由として、図-6 に示す曲げ応力-変位関係の一例を見ると、B11-3 と比べ、B15-12 は最大応力後、緩やかに応力が低下している。これは繊維 1 本当り付の付着面積が大きい程、繊維の引き抜け時に繊維とモルタルマトリックス界面との摩擦によるエネルギー消費量が大きくなることに起因すると考えられる。以上のことから曲げ特性を向上させる場合においては、繊維 1 本当り付の付着面積が大きい繊維を使用することが望ましいと言える。

2.3 提案配合

バサルト繊維を用いた FRCC の流動性を改善するため、配合の提案を行った。表-5 に提案配合を示す。既往の配合との変更点として、単位水量をほぼ一定として、細骨材/結合材を低下させることでファイバボール内に堆積する細骨材量を減らし、流動性を向上させた。また、細骨材の減少に伴うセメント量の増加による圧縮強度の増加を強度発現が遅いフライアッシュを増加させることにより、低減させた。提案配合により、モルタルフローは 10cm から 16.8cm に改善し、施工性に問題のない流動性を確保できたため、以降、表-5 の提案配合にて、FRCC の特性の検討を行う。

表-6 パラメータ

供試体名	繊維混入率 (%)	
	バサルト	PP
PP1.0	0	1.0
B1.0	1.0	0
B0.75_PP0.25	0.75	0.25
B0.5_PP0.5	0.5	0.5
B0.25_PP0.75	0.25	0.75
備考	バサルト繊維 →繊維径15 μ m, 繊維長12mm PP繊維 →繊維径64.8 μ m, 繊維長12mm 供試体名 →英字: 繊維種, 数字: 繊維混入率	

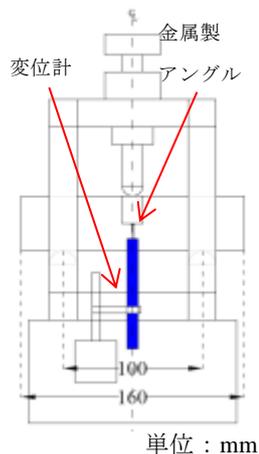


図-7 曲げ試験

表-7 基本特性 (平均値)

供試体名	モルタルフロー cm	圧縮強度 N/mm ²	曲げ強度 N/mm ²	曲げ/圧縮
PP1.0	36.5	45.7	5.96	0.131
B1.0	17.55	41.6	8.33	0.200
B0.75_PP0.25	18.95	48.1	8.52	0.177
B0.5_PP0.5	23	49.8	8.31	0.167
B0.25_PP0.75	29.4	49.1	6.70	0.137

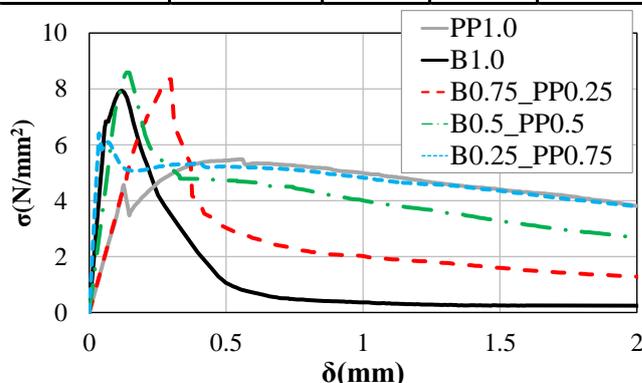


図-8 曲げ応力-変位関係 (一例)

3. バサルト繊維と他種繊維を組み合わせた FRCC

3.1 試験概要

バサルト繊維は強度増加には効果があるが靱性能に乏しいため、強度増加効果が低く、靱性能の大きい PP 繊維と組み合わせることで互いの弱点を補うことを期待して、バサルト繊維と PP 繊維を組み合わせた FRCC (以下、hybrid 型 FRCC) の特性の評価を行った。パラメータは 2 種の繊維の混合割合とし、繊維混入率は合計で 1.0% と一定とした (表-6)。繊維の物性は表-1, 配合に関しては表-5 を参照していただきたい。供試体は 40×40×160mm 供試体を各パラメータで 3 体ずつ作成した。試験はモルタルフロー試験, 圧縮試験, 曲げ試験を実施し, 試験方法に関しては前章の基本特性試験と同様であるが, 図-7 に示すように曲げ試験時に中央変位を測定した。なお, 曲げ試験時には支点変位を考慮するべきであるが, 载荷治具の構造上, 困難であったため, あくまで傾向の把握を目的として中央変位のみの測定とした。

3.2 試験結果

表-7 に基本特性試験結果を示す。モルタルフロー値から PP 繊維が流動性に与える影響が小さいと言える。曲げ強度に関して, 各パラメータで圧縮強度が異なっており, 圧縮強度の違いによっても曲げ強度に違いが生じるため, 曲げ強度を圧縮強度で除した曲げ強度/圧縮強度 (以下, 曲げ/圧縮) で曲げ特性の比較を行う。曲げ/圧縮からバサルト繊維の割合が大きくなるにしたがって, 曲げ強度増分は高くなる傾向にある。バサルト繊維の混入によって, 曲げ強度が向上することが明らかとなった。

図-8 に各パラメータの曲げ応力-変位関係の一例を示す。初期の剛性に関しては中央変位のみの測定となっている影響で, ばらつきが大きくなっているため, 曲げ応力-変位関係で初めて応力が低下した点以降の傾向を比較することとした。図-8 を見ると, 最大強度に達する変位に違いが生じていることがわかる。

PP1.0 は変位 0.5mm~0.75mm 程度で最大強度を示しているが, バサルト繊維と組み合わせたパラメータは変位 0.5mm 未満で最大強度に至っている。これは繊維の付着強度の違いから最も強度を発揮する変位が異なるためと推測できる。以上の結果から hybrid 型 FRCC に関して, 繊維の混入割合によって, それぞれの繊維特性が反映されることが分かった。

4. 使用性能および剥落抵抗性の評価

4.1 試験概要

本章では使用性能ならびに剥落抵抗性の評価を行った。パラメータは繊維無, バサルト繊維単体, 剥落抵抗性を有する繊維として適用実績のある PP 繊維単体に加え, hybrid 型 FRCC の計 4 種とした (表-8)。配合は各パラメータでフロー値を統一する為, 高性能 AE 減水剤量を調節した (表-8)。試験は, 基本特性試験 (スランプフロー, 空気量, 圧縮強度, 曲げ強度) に加え, 使用時における性能の評価として JIS A 1129-2 に準拠し, 乾燥収縮ひずみの測定を行い, 曲げ試験時において, 図-9 に示すように供試体下面の曲げ引張ひずみを測定し, 初期ひび割れ強度の測定を行った。剥落抵抗性の評価に関しては JIS 730-2003 (NEXCO 試験方法) に準拠し, 図-10 に示すように行った。試験体は各パラメータで 5 体ずつとし, 結果に関してはその平均値を示している。

4.2 基本特性

表-9 に基本特性試験結果を示す。フレッシュ性状に関して, 高流動モルタルとしてのフロー値を確保でき, 配向性を統一できた。B1.0 のみファイバーボールの影響からか圧縮強度の低下が見られた。しかし,

hybrid 型 FRCC に関してはバサルト繊維の本数が減り、ファイバーボールの発生の抑制ができ、圧縮強度の低下を小さくすることができた。また、各供試体の曲げ破壊性状は、繊維の引き抜けによる破壊であった。

4.3 使用性能の評価

表-10 に脱型後 28 日目における乾燥収縮ひずみおよびひび割れ発生時付近における結果を示した使用性能比較一覧を示す。用語の定義について、曲げ応力-曲げ引張ひずみ関係で線形弾性の仮定が成り立たなくなる際の応力をひび割れ発生強度、初めて曲げ応力が低下した際の応力を曲げ降伏強度とした。乾燥収縮ひずみから、繊維の混入によって乾燥収縮ひずみにほとんど影響を及ぼさず、バサルト繊維においても普通モルタルと同等の評価が可能であることを示した。ひび割れ発生時の強度、ひずみを比較すると、繊維の混入によって、初期ひび割れの抑制が可能であることがわかる。特に B1.0 はひび割れ発生強度が高くなった。hybrid 型 FRCC もひび割れ発生強度が高くなると考えられたが、P1.0 よりも小さくなった。これはバサルト繊維の混入数が少なかったためであると考えられる。しかし、曲げ降伏強度に関しては若干ではあるものの上昇しているため、バサルト繊維を用いることで使用時における強度は期待できると推察される。

図-11 に曲げ応力-変位関係の一例を示す。ひび割れ発生後の挙動について、ひび割れ発生時以降は繊維が曲げ引張応力を分担している領域であると考えられる。ひび割れ発生以降も応力が増加しているのは繊維の架橋効果によるものと考えられ、バサルト繊維、PP 繊維ともに強度の上昇は見取れる。しかし、最大応力以降では両者の挙動は異なっており、図-11 を見ると、B1.0 は応力が急激に低下している。一方 PP1.0、B0.25_PP0.75 は最大応力後も緩やかに応力が低下している。これは両者の繊維の付着強度が関係していると考えられ、B1.0 の場合は供試体下縁に配向された繊維の全長が抜け出しに至った時点（曲げ強度）で、繊維の付着強度が低いことで、ひび割れ面に存在する繊維が次々に抜け出し、急激に応力が低下する。一方、PP 繊維は付着強度が高いため、繊維のひび割れに対する架橋効果が高く、曲げ強度以降も緩やかに応力が低下したと推察できる。

4.4 剥落抵抗性の評価

剥落抵抗性の評価に関して、NEXCO トンネル覆工管理要領⁵⁾では、試験体 4 体全てが載荷点変位から算出した補正中央点たわみ 3mm において荷重 4.1kN を下回らないこと（条件 I）、試験体 4 体の平均曲げ靱性係数が 1.4N/mm² 以上であること（条件 II）を満たすことで、地山の変形や偏圧、鉄筋の膨張圧に対する剥落防止効果を有する材料として適用が可能となる。

表-8 パラメータおよび配合

供試体名	繊維混入率 (%)		水/結合材 W/B (%)	FA置換率 FA/B (%)	細骨材/結合材 S/B (%)	SP混入率 SP/B (%)	繊維混入率 合計 (%)
	バサルト	PP					
N	0	0	38	31	20	0.2	0
PP1.0	0	1.0	38	31	20	0.35	1.0
B1.0	1.0	0	38	31	20	1.5	1.0
B0.25_PP0.75	0.25	0.75	38	31	20	0.5	1.0

供試体名-英字:繊維種, 数字:繊維混入率

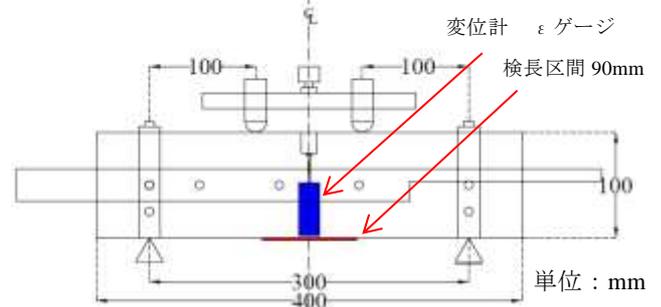


図-9 曲げ試験

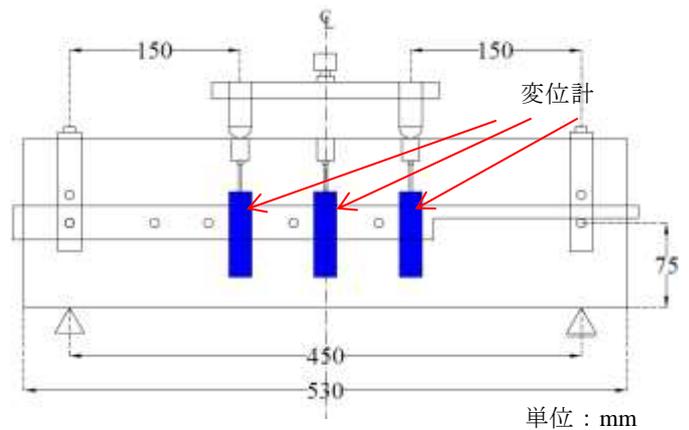


図-10 剥落抵抗性評価試験

表-9 基本特性 (平均値)

供試体名	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	曲げ強度 (N/mm ²)
N	46.1	0	50.5	17.3	0.24	1.20
PP1.0	62.9	0.7	48.2	16.9	0.24	4.12
B1.0	62.3	1.9	39.4	15.5	0.23	5.34
B0.25_PP0.75	74.4	3.1	46.5	17.0	0.24	3.46

表-10 使用性能比較 (平均値)

供試体名	ひび割れ発生強度		曲げ降伏強度	乾燥収縮ひずみ
	応力(N/mm ²)	引張線ひずみ(μ)	応力(N/mm ²)	(μ)
N	1.20	112	2.73	-1550
PP1.0	2.73	153	2.73	-1611
B1.0	3.82	245	2.84	-1541
B0.25_PP0.75	2.16	135	2.84	-1598

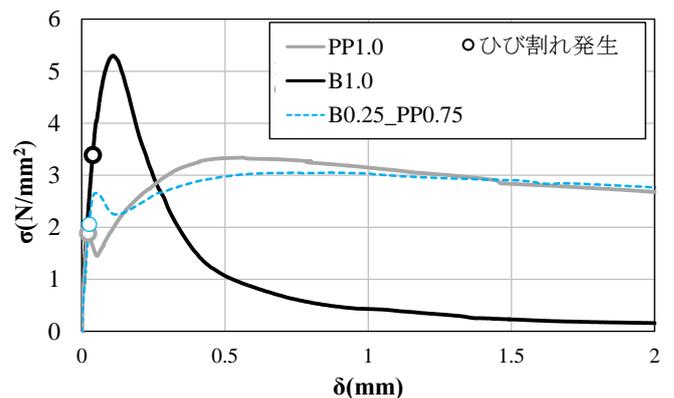


図-11 曲げ応力-変位関係 (一例)

表-11 試験結果および要求性能判定結果

供試体名	供試体番号	曲げ強度 平均値 (N/mm ²)	曲げ降伏強度 平均値 (N/mm ²)	曲げ靱性係数 平均値 (N/mm ²)	中央点たわみ 3mm における 荷重(kN)	要求性能判定		
						条件Ⅰ	条件Ⅱ	合否
PP1.0	No.1	3.10	1.65	2.72	20.5	○	○	○
	No.2				11.1			
	No.3				25.1			
	No.4				16.3			
B1.0	No.1	4.37	/	1.15	0.6	×	×	×
	No.2				0.0			
	No.3				0.2			
	No.4				0.4			
B0.25_ PP0.75	No.1	2.67	2.57	2.37	13.2	○	○	○
	No.2				15.8			
	No.3				15.7			
	No.4				13.5			

表-11 に要求性能の判定結果を示す。なお、補正中央点たわみから求めた結果と中央点たわみから求めた結果がほとんど同等であり、中央点たわみは全供試体で 3mm まで計測できたため、表-11 に示す結果は中央点たわみから求めた試験結果を示す。

表-11 を見ても明らかなように、バサルト繊維単体では剥落抵抗性に対する要求性能を満たさないことがわかる。hybrid 型 FRCC に関しては要求性能を満たしており、PP 繊維と併用することで、剥落抵抗性を有することが可能であると言える。ただし、靱性能に関しては現状のバサルト繊維の付着特性では期待できないため、靱性能のみを期待する際は PP 繊維の混入率を上昇させる必要があると考えられる。

以上の検討の結果から、バサルト繊維単体を用いる際はひび割れ抵抗性には効果は期待でき、剥落防止程度の靱性能を有し、かつ使用時における強度を更に上昇させたい場合には PP 繊維とバサルト繊維を併用するなど、FRCC として期待する性能に合わせて使用する繊維やその混入率を変更させることが必要であると言える。

5. 今後の繊維の開発に向けた提言

バサルト繊維の特性から現状のバサルト繊維の付着特性を向上させる必要があることがわかった。よって、より繊維径の太い繊維を製造するまたは繊維製造時に結束力の強い集束剤を使用して、繊維径を実質的に大きくする必要があると考えられる。

6. まとめ

本研究では、バサルト繊維を FRCC に適用した際のフレッシュ性状、硬化性状を把握し、適切な流動性を確保した配合の提案を行った上で、実構造物適用性を見据えて、PP 繊維と組み合わせるなどして、使用性能および剥落抵抗性の評価を行った。また、今後の繊維の開発への提言を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) バサルト繊維の繊維束の結束状態によって、FRCC の流動性への影響は異なり、解繊型繊維を用いた際は流動性が極端に悪化し、集束型繊維を用いた際は流動性にほとんど影響を与えない結果となった。
- 2) 流動性の悪化による充填率の減少により強度は下がるが、バサルト繊維自身の特性によって圧縮特性への影響はないことが分かった。
- 3) 繊維 1 本あたりの付着面積が大きい繊維を用いる方が曲げ強度および曲げ靱性能は高くなることが分かった。また、破壊形式は繊維の引き抜け型破壊となり、付着性状の向上によって、更なる靱性能の向上が期待できることが示唆された。
- 4) 解繊型のバサルト繊維を用いた際は繊維混入率 1.0%において、水/結合材 38%、細骨材/結合材 20%、フライアッシュ置換率 31%、高性能 AE 減水剤/結合材 1.5%の配合とすることで高流動モルタルとして適切な流動性を確保できた。
- 5) バサルト繊維と PP 繊維を併用した FRCC に関して、繊維の混入割合によって破壊特性にそれぞれの繊維特性が反映される結果となった。
- 6) バサルト繊維単体で用いる際はひび割れの抑制効果が期待でき、剥落防止程度の靱性を有し、かつ使用時の強度を上昇させたい場合には PP 繊維とバサルト繊維を併用するなど、FRCC として期待する性能に合わせて使用する繊維を使い分けることが望ましいと考えられる。
- 7) 今後の繊維の開発に向けて、繊維径の太い繊維を製造するまたは繊維の製造段階で結束力の強い集束剤を使用して、繊維径を実質的に大きくすることで繊維の付着性状を向上させる必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 26 年度国土交通白書，2015
- 2) 田中徹，岡野法之，小島芳之：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.1，2012
- 3) 佐藤貴文，井上真澄，岡本享久，児島孝之：バサルト繊維により補強したモルタルの強度特性，土木学会関西支部年次学術講演会，2007
- 4) 野崎佑太，角掛久雄，久保英之，大内一：DFRCC によるせん断破壊型 RC 梁のウェブ補強効果に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol. 35，pp.1405-1410，2013
- 5) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領，繊維補強覆工コンクリート編，2015

討議

討議 [木内龍彦先生]

バサルト繊維を混入することでフロー値が大きく低下していますが、その結果は施工上、適用可能なレベルであるのでしょうか

回答

解繊型バサルト繊維を混入した際に粘性が大きく向上することで、スランプフロー値が40cm程度となり、高流動モルタルとしては施工性に乏しい結果となりました。しかし、文献[1]に示される ECC を用いた覆工コンクリートに対する吹き付けによる補強において、スランプフローの品質管理値は $32.5 \pm 7.5\text{cm}$ とされており、吹き付け工法で覆工コンクリートに用いる際はバサルト繊維による FRCC の粘性の向上は有用な結果と言えます。

討議 [木内龍彦先生]

引張強度を得るうえで、割裂引張試験を行わなかった理由を教えてください。

回答

割裂引張試験ではひび割れ発生強度は測定できませんが、FRCC のような靱性能を有する材料においてはひび割れ発生以降も強度を保持します。そのため、割裂引張試験では供試体の変形により、終局強度まで測定できないことが予想されるため、今回は行いませんでした。

討議 [鬼頭宏明先生]

バサルト繊維を FRCC に適用した際のいい点を教えてください。

回答

バサルト繊維を FRCC に用いることで、繊維の弾性係数の高さから PP 繊維などの有機繊維を用いた際と比べ、ひび割れ発生強度が上昇することが利点であります。

討議 [角掛久雄先生]

繊維径を大きくすると、それ以上に繊維の破断荷重も大きくなるので、繊維の引張強度を最大限活かす為に繊維長を長くする方が現実的であると考えられますが、繊維長を長くすると流動性が悪化する可能性があるのではないですか。

回答

確かに繊維長を長くするとファイバーボールが発生

しやすくなるので、施工性に関しては問題であります。そのため、繊維を集束することで表面凹凸をつくりだし、表面積を大きくすることで付着性状の向上を図る必要があると考えました。また、本文献には記載していませんが、文献[2]において、同じ繊維径、繊維長の製造地が異なる 2 種のバサルト繊維を用いた FRCC の強度試験結果を比較した際、曲げ強度に違いが見られたことから繊維の製造地（繊維に塗布する集束剤の違い）によって繊維の付着性状が異なった可能性があることが示唆されています。以上のことから集束剤の特性や繊維形状の変更により、付着性状の改善が可能となると考えています。

討議 [角掛久雄先生]

今後の繊維の開発に対しての提言で集束型繊維を適用すべきとしていますが、その根拠を示してください。

回答

今回示した例では主に解繊型繊維について検討を行いました。解繊型繊維では繊維の付着強度の低さならびに繊維径が小さいことから付着性能が低く、ひび割れ発生以降靱性をほとんど発揮しないという結果が得られました。集束型繊維は解繊型繊維に比べ、繊維径が実質的に大きくなっているだけでなく、集束することで表面に凹凸ができるため、付着面積は大きくなります。靱性能に関してはひび割れ発生以降の繊維の抜け出しに対する抵抗性が大きく影響するので、解繊型繊維よりも集束型繊維の方が靱性能は大きくなることが予想されます。

討議 [山口隆司先生]

研究目的で今後の繊維の開発に対する提言を行うと書いていますが、その提言はバサルト繊維のみのものなのか、また具体的にどのような提言を行ったのか、お聞かせください。

回答

提言はバサルト繊維のみのものであります。バサルト繊維の今後の開発としては、靱性能の向上のため、付着性状を改善することが必要であることが分かったので、繊維径の大きい繊維を使用するまたは、結束力の強い集束剤を使用することで、実質的に繊維径を大きくし、繊維 1 本当たりの付着面積を大きくするような繊維を開発することが必要であると言えます。

討議 [山田卓先生]

繊維の配向性についての意見が述べられていましたが、繊維は曲げ引張強度方向に配向する方がいいのかそれともランダムに配向する方がいいのかどちらでしょうか。

回答

本来ならば曲げ引張方向に一樣に配向する方が望ましいですが、実構造物に適用する際には断面厚の増加や施工上のばらつき、せん断力に対する影響を踏まえると、配向はランダムになった方がより安全側の評価となると言えます。本研究では供試体寸法が大きくなった際の検討も行っており、供試体寸法が大きくなれば、配向がランダムになるため、試験結果は妥当であると言えます。

討議 [山田卓先生]

バサルト繊維が開発された経緯について教えて下さい。

回答

バサルト繊維は原料が玄武岩であるため、同じ無機繊維であるガラス繊維や炭素繊維と比べ、安価である点や高い耐熱性から焼却後の残渣がリサイクル可能である点が注目されており、上記の繊維に代わる材料として開発されました。適用実績としては車の部品やテニスラケットに利用されています。土木分野においてはFRPとして研究が進み、その性能が確認できてはいますが、コンクリート用短繊維としては開発段階であります。

参考文献

- [1] 山本拓治, 名見耶薫, 平石剛紀, 坂田昇, 清水満, 真下英人: 高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補修技術—中越地震で被災したトンネル補修工事への適用—, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 2005.9
- [2] 盛岡諒平, 藤原資也, 角掛久雄, 鬼頭宏明: 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, 2015.9