

論文 バサルト繊維補強モルタルの力学的特性に関する基礎的研究

高橋 広大^{*1}・Sanjay PAREEK^{*2}

要旨：バサルト繊維は高い強度や防火性能を有しているが、日本においてバサルト繊維補強コンクリートの研究は現状少ない。そこで、本研究では玄武岩が原材料であるバサルト繊維を用いたモルタルのフレッシュ時の性状及び力学的特性について、圧縮強度、引張強度及び曲げ強度を一般的に主流である鋼繊維、PVA及びガラス繊維と比較検討を行った。その結果、バサルト繊維補強モルタルは他の繊維補強モルタルと比較して高い圧縮強度、引張強度、圧縮タフネス及び曲げタフネスを示した。

キーワード：バサルト繊維、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、曲げ強度、曲げタフネス

1. はじめに

繊維補強コンクリートは、繊維を混入することにより繊維の架橋効果によって、コンクリートマトリックスの靱性や耐久性を飛躍的に向上させる¹⁾。ゆえに、脆性材料であるコンクリートの破壊挙動を改善するために繊維補強は、コンクリート構造物の靱性や耐久性向上において、重要である。しかし、繊維は製造時において廃棄物による大気汚染がある等、近年では環境負荷低減型の繊維補強コンクリートの開発が求められている²⁾。

そこで、本研究では製造工程において、廃棄物がでないため、環境負荷が少ないバサルト繊維の使用に着目した。バサルト繊維は天然資源である玄武岩を熔融及び紡糸することにより製造できるものであり、コンクリートと同程度の線膨張係数及び高い引張強度等の特性をもつ。

また、バサルト繊維を使用したコンクリートは耐火性、曲げ強度及び引張強度等において高い耐久性を有していることが確認されている^{3) 4) 5) 6) 7) 8)}。そのため、コンクリートにバサルト繊維を混入することにより、コンクリート構造物の耐久性向上が期待できる。

しかし、国内におけるバサルト繊維補強コンクリートについての研究は現状少ないため、バサルト繊維補強コンクリートの材料特性についてより明らかにする必要がある。

2. 実験概要

本研究では、バサルト繊維補強モルタル(Basalt Fiber Reinforced Mortar, 以下 BFRM)の基礎的特性を明らかにするために圧縮強度試験、割裂引張強度試験及び曲げ強度試験を行った。供試体のパラメータとして、無機繊維であるバサルト(繊維長: 21.9mm, 繊維径: 13.2 μ m, アスペクト比: 1650, 以下 B) 繊維を鋼(繊維長: 30.0mm, 繊維径: 0.60mm, アスペクト比: 50, 以下 S 繊維)繊維、耐アルカリガラス(繊維長: 13.0mm, 繊維径: 13.5 μ m, アスペクト比: 960, 以下 G) 繊維及び有機繊維であるポリビニルアルコール(PVA)(繊維長: 30.0mm, 繊維径: 0.66mm, アスペクト比: 45, 以下 P) 繊維と比較検討を行った。

3. 使用材料及び供試体概要

3.1 使用材料

Table 1 に B 繊維の化学組成を示し、Table 2 にモルタルの配合表を示す。モルタル供試体の使用材料として、セメントに普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³, 比表面積: 3290cm²/g), 細骨材に珪砂(密度: 2.63g/cm³,

Table 1 Chemical Composition of Basalt Fiber (wt.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Others
52.8	22.1	7.9	7.7	4.5	1.9	1.5	1.2	0.4

Table 2 Mix Proportions and Physical Properties of Materials Used for Fiber Reinforced Mortars

Type of Fiber Reinforced Mortar	Cement	Sand	Water	Additive	Fiber (Vol.%)		W/C (%)
					0.5	1.0	
Basalt (BFRM)	3.16	2.63	1.00	1.09	B: 2.60	P: 1.30	50.0
Steel (SFRM)					S: 7.85	G: 2.80	
Polyvinyl Alcohol (PFRM)	530	1590	265	4.0	6.8	13.5	50.0
Glass (GFRM)					14.6	29.1	

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)



Photo 1 Appearance of Basalt Fiber

最大粒径：0.59mm)，混和剤に高性能 AE 減水剤(密度：1.09g/cm³)を用いた。本研究で使用した B 繊維を Photo 1 に示す。

3.2 配合

本研究に用いた繊維補強モルタルは、水セメント比による強度の影響を無くすため、水セメント比を 50% に固定した。また、普通モルタルにおいて目標フロー値を 175 ± 5cm，空気量を 4.5 ± 1.5% に調整を行い、繊維を混入した。本研究に用いた配合における繊維混入率は 0.5 及び 1.0% とし、外割の体積比で配合した。

3.3 供試体概要及び練混ぜ方法

JSCE-F 552-2010 (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)に準じて、圧縮強度試験及び割裂引張強度試験を寸法 φ100×200mm に曲げ強度試験には 100×100×400mm にそれぞれ成型し、各種試験に各種供試体を 3 体ずつ作製した。練混ぜは Table 2 の配合で 3 分間の空練を行い、水を加えて 5 分間の本練の後に繊維を投入し、3 分間の練混ぜを行った。

3.4 養生条件

打設した供試体を 1 日(以下 d)湿空[20℃, 90%(RH)]養生を行った後、6d の水中(20℃)養生を行い、21d 乾燥[20℃, 60%(RH)]室で静置といった手順で合計 28d の養生を行い、各種供試体を作製した。

4. 実験方法

4.1 フレッシュ時の性状

フレッシュ時における性状は、各種繊維補強モルタルのフロー試験及び空気量試験により評価した。

4.2 圧縮強度試験

JCI-SF 5 (鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度及び圧縮タフネス試験方法)に準じて、載荷時に連続的な荷重及び載荷方向に対してのひずみを測定した。また、ひずみの測定箇所は供試体の軸方向左右対称に 2 箇所との測定とし、各種 3 体における供試体の応力-ひずみ曲線の平均値から、圧縮強度及び圧縮タフネスを算出した。また、JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法)に準じて、静弾性係数を算出した。

4.3 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)に準じて、載荷時による連続的な荷重及び載荷方向に対して直角方向のひずみの測定を行い、各種 3 体の供試体の応力-ひずみ曲線の平均値から、割裂引張強度を算出した。

4.4 曲げ強度試験

JCI-SF 4 (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)に準じて、各種 3 体の供試体の荷重-たわみ曲線の平均値から、曲げ強度及び曲げタフネスを算出した。また、曲げ試験における供試体中央部のたわみ及び曲げ荷重から、たわみが 2mm までの荷重-たわみ曲線下の面積を曲げタフネスと称して算出した。

5. 実験結果及び考察

5.1 フレッシュ時の性状

Fig.1 に繊維混入率におけるフレッシュ時のフロー値を、Fig.2 に空気量をそれぞれ示す。

Fig.1 において、全ての繊維補強モルタルは繊維混入率の増加に伴い、フロー値が低下する傾向を示した。これは、モルタルの内部摩擦の増大により、フロー値が低下したと推察する。また、BFRM は普通モルタルと比較して、フロー値が著しく低下していることが顕著に現れている。

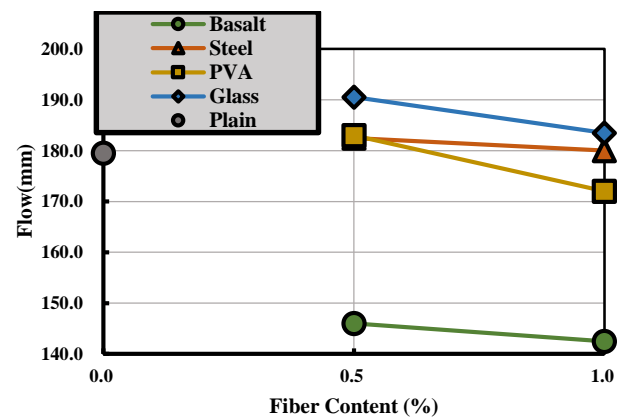


Fig.1 Flow vs. Fiber Content of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

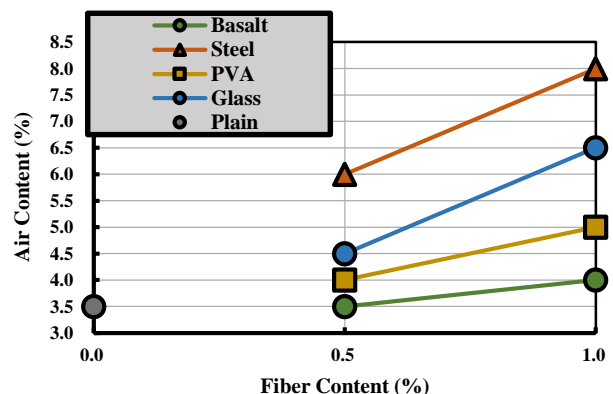


Fig.2 Air Content vs. Fiber Content of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

Fig.2において、全ての繊維補強モルタルは繊維混入率の増加とともに空気量が増加する傾向を示している。混入率0.5%BFRMでは普通モルタルと同程度の値を示した。また、他の繊維補強モルタルと比較して、BFRMにおいては繊維混入率の増加は空気量にほとんど影響を与えないことを示した。

5.2 圧縮強度試験

Fig.3に各種繊維補強モルタルの圧縮強度試験における圧縮強度を示す。Fig.3において、混入率0.5%GFRMを除いた全ての繊維補強モルタルを普通モルタルと比較して、圧縮強度が増加したのが確認できる。また、混入率0.5%BFRMにおいては、他の繊維補強モルタルより高い強度を発現していることが分かる。しかし、BFRMにおいては繊維混入率0.5%から1.0%の増加に伴い、圧縮強度が低下する傾向を示した。今後、繊維混入率による圧縮強度の影響について検討が必要である。

標準偏差においてはBFRMの標準偏差が他の供試体と比較して小さいことが確認できる。これは、B繊維の密度がセメントモルタルとほぼ同じため、分離が発生し難いことが考えられる。このことから、B繊維は他の繊維と比較して、分散性が特に高いと推察される。

Fig.4に各種繊維補強モルタルの応力-ひずみ曲線を示す。Fig.4より、ひずみが1%までの応力において、BFRMは混入率1%GFRMと比較して、同程度の応力を示した。しかし、混入率1%GFRMはひずみが1%を超えてから緩やかに応力が低下しているが、BFRMにおいてはひずみの増加に伴い、応力も増加していることが確認できる。

Fig.5に各種繊維補強モルタルの静弾性係数を示す。S繊維を使用した場合、圧縮に関しては繊維混入率の増加による弾性係数はほとんど影響しないことが報告されている¹⁾。また、P繊維においては混入することにより、コンクリートの弾性係数が同等または低下する傾向がある⁹⁾。Fig.3と同様に、BFRMも圧縮強度の変化に伴い、弾性係数が変化する傾向を示した。

混入率0.5%BFRMにおいては、圧縮応力作用化におけるB繊維が分担する応力が大きいため、弾性係数が増加したが混入率1%BFRMでは弾性係数が若干低下する傾向を示した。以上より、BFRMにおいては繊維混入率の増加に伴い、圧縮強度及び弾性係数が低下することが推察される。

Fig.6に圧縮タフネスを示す。Fig.6において、普通モルタルの圧縮タフネスの値が7.27N・mmに対して、BFRMの圧縮タフネスは繊維混入率0.5%では12.37N・mmで1.70倍、1%の混入率とした場合12.81N・mmで、1.76倍となっており、高い圧縮タフネスの値を示した。

また、BFRMにおいて、繊維混入率の増加による圧縮タフネスの値は若干増大する傾向である。このことより、

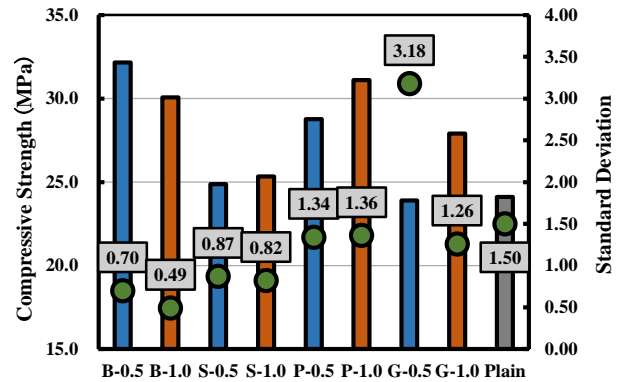


Fig.3 Compressive Strength of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

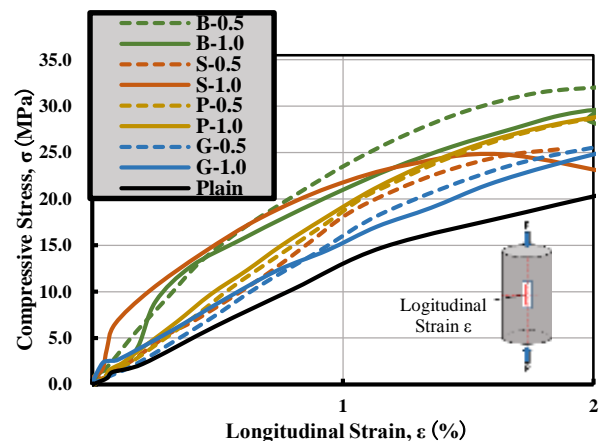


Fig.4 Compressive Stress (σ) vs. Longitudinal Strain (ϵ) Curves of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

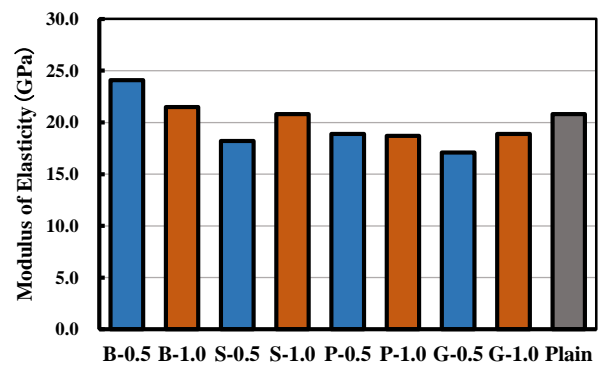


Fig.5 Modulus of Elasticity of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

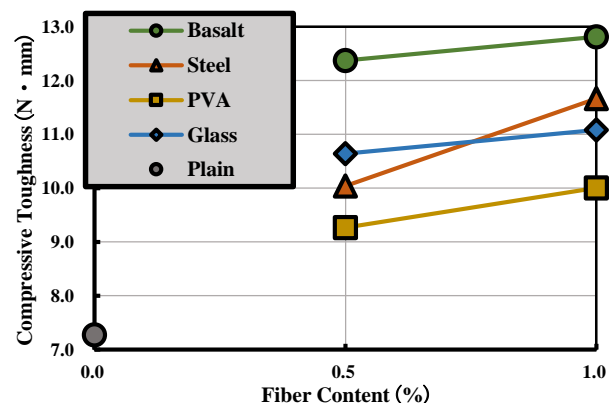


Fig.6 Compressive Toughness vs. Fiber Content of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

BFRMにおける繊維混入率の増大は圧縮タフネスにほとんど影響を与えないことが分かった。また、BFRMの圧縮タフネスは他の繊維補強モルタルと比較して、高い値を発現することが確認できた。

5.3 割裂引張強度試験

Fig.7 に各種繊維補強モルタルの割裂引張強度を示す。Fig.7において、全ての繊維補強モルタルは繊維混入率の増加に伴い、増大する傾向を示した。普通モルタルの割裂引張強度が1.94MPaに対して、BFRMは普通モルタルと比較して繊維混入率0.5%では2.37MPaで1.22倍、繊維混入率1.0%では2.60MPaで1.34倍となっており、高い割裂引張強度を示した。また、混入率1%BFRMにおいては、他の繊維補強モルタルと比較して、高い割裂引張強度を発現した。このことより、B繊維はモルタルとの付着性が高いことから、BFRMの割裂引張強度が増進したと推察される¹⁰⁾。また、圧縮強度とは対称的に繊維混入率の増加に伴い増加した。

Photo 2 に混入率1%BFRMの割裂引張強度試験後の供試体断面を示す。

B繊維の分散性についてはPhoto 2より、B繊維が一様に分散していることが分かる。また、B繊維がランダムな角度に配向し、繊維の破断やプルアウト現象が確認できることから、スナッピング効果が有効的にはたらいたことが分かる¹⁰⁾。そのため、B繊維とモルタルマトリックスとの付着性が向上し、引張強度が増加したと考えられる。

Fig.8 に各種繊維補強モルタルの応力-ひずみ曲線を示す。Fig.8より、BFRMは普通モルタルと比較して、高い剛性を有していることが顕著に現れている。

混入率0.5%BFRMは、混入率1%SFRCと比較してほとんど相似の変化を示し、混入率1%BFRMは他の繊維補強モルタルと比較して、最も高い靱性を示した。

Fig.9 にアスペクト比と割裂引張強度の関係を示す。アスペクト比は繊維長を繊維径で除した値であり、アスペクト比と引張強度の相関性は一般的に繊維のアスペクト比が高いほど引張性能は向上するとされている¹⁾。Fig.9より、BFRMはアスペクト比が1650と他の繊維補強モルタルより高いアスペクト比を有している。このことか

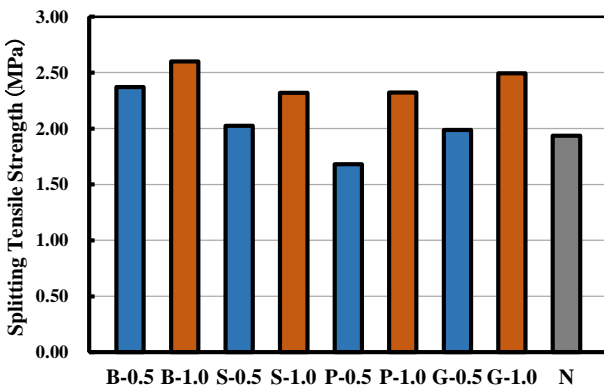


Fig.7 Splitting Tensile Strength of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

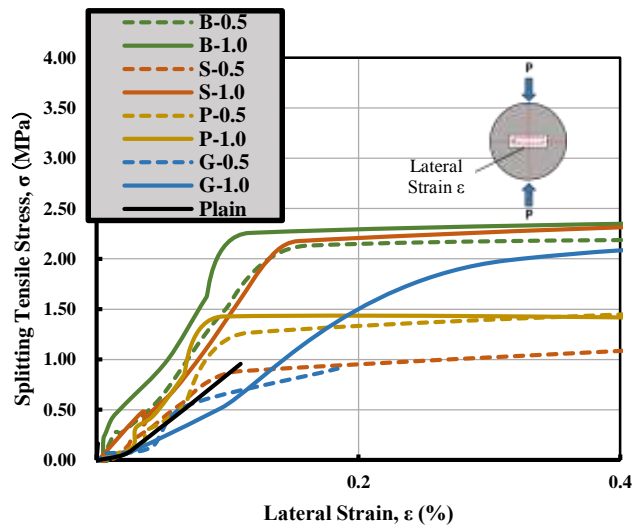


Fig.8 Splitting Tensile Stress (σ) vs. Lateral Strain (ϵ) Curves of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

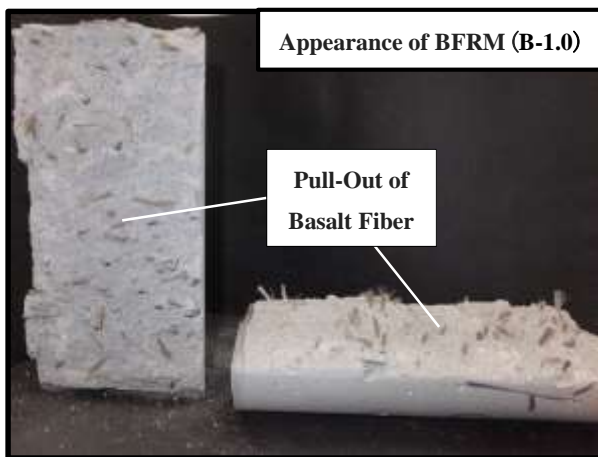


Photo 2 Appearance of Basalt Fiber Reinforced Mortar after Splitting Tensile Strength Test

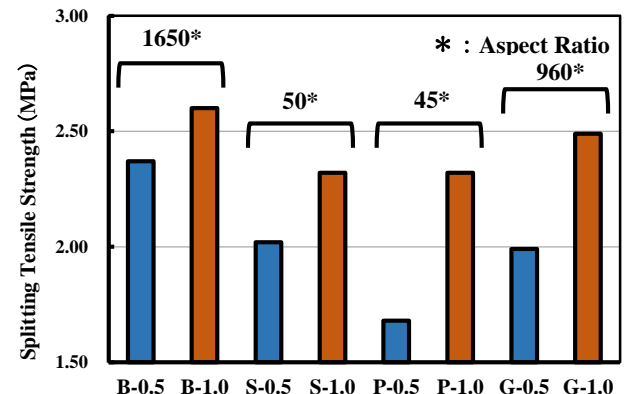


Fig.9 Effect of Aspect Ratio on Splitting Tensile Strength of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced

ら、繊維の付着性が他の繊維より高いため、BFRMは高い割裂引張強度を発現した。

5.4 曲げ強度試験

Fig.10 に各種繊維補強モルタルの曲げ強度を示した。Fig.10 より BFRM の曲げ強度は比較用として用いた普通モルタルより高い曲げ強度が発現したものの、他の繊維補強モルタルと比較して低い曲げ強度を示した。

BFRM の標準偏差においては他の繊維補強モルタルと比較して、小さい値を示した。これも Fig.3 と同様に B 繊維の高い分散性によって、曲げ強度のばらつきが小さくなったと考えられる。このことより、B 繊維の高い付着性により、高い曲げ強度が発現したと推察する。

Fig.11 に各種繊維補強モルタルの典型的な荷重-たわみ曲線を示す。Fig.11 より、混入率 1%BFRM は混入率 1%SFRC と比較して、たわみ 1mm 付近まで低い荷重を示したがその後、混入率 1%SFRC は荷重が急激に低下し、破壊された。しかし、混入率 1%BFRM においては最大荷重に達した後、緩やかに荷重が低下する傾向を示した。このことより、B 繊維とモルタルマトリクスとの付着性が高いことが言え、最大荷重に達した後も B 繊維で荷重を負担していたことが分かる。

Fig.12 に Fig.11 から算出した曲げタフネスを示す。

Fig.12 より、普通モルタルの曲げタフネスの値は他の繊維補強モルタルと比較して、 $0.45\text{N}\cdot\text{mm}$ と低い値を示した。一方、全ての繊維補強モルタルにおいて、繊維混入率の増加に伴い曲げタフネスが同等または増加する傾向を示した。また、BFRM においては他の繊維補強モルタルと比較して、高い曲げタフネスの値を示した。他の繊維補強モルタルと比較して、混入率 0.5%BFRM は最大で 3.5 倍、最小で 1.8 倍の値を示し、混入率 1%BFRM においては最大で 4.1 倍、最小で 2.1 倍と他の繊維補強モルタルと比較して、高い曲げタフネスを示した。このことから、B 繊維を混入することにより他の繊維補強モルタルと比較して、モルタルの靱性を大きく改善できることが確認できた。

Fig.13 に各種繊維補強モルタルの圧縮タフネスと曲げタフネスとの関係を示す。また、 R^2 を決定係数とする。Fig.13 より、圧縮タフネスと曲げタフネスの相関性は繊維混入率の増加に伴い、圧縮タフネスと曲げタフネスがともに大きく増加する傾向を示した。このことより、B 繊維の混入率増加はモルタルの靱性向上に寄与していることが確認された。また、Fig.13 より圧縮タフネスと曲げタフネスには高い相関性が確認され、その回帰曲線を式(1)で表す。

$$T_b = 0.0019e^{0.7527T_c} \quad (1)$$

ここに、 T_b : 曲げタフネス ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

T_c : 圧縮タフネス ($\text{N}\cdot\text{mm}$)

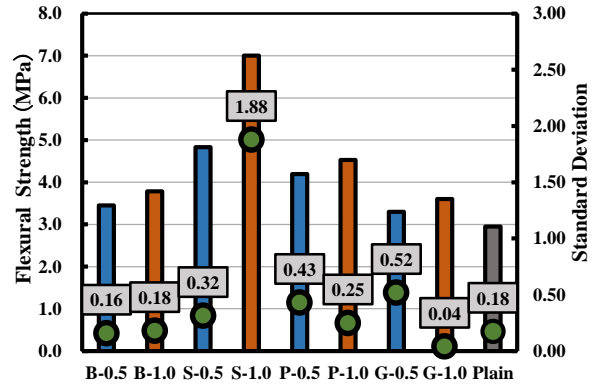


Fig.10 Flexural Strength of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

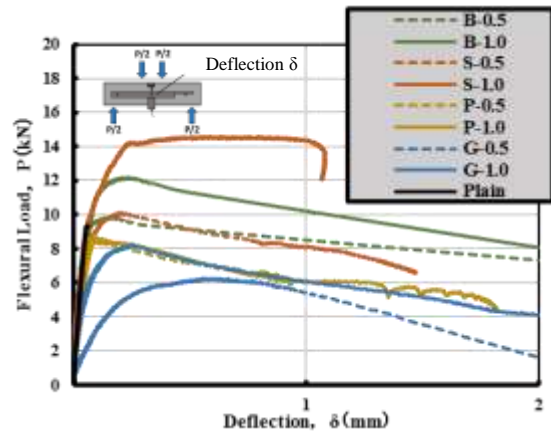


Fig.11 Flexural Load (P) vs. Deflection (δ) Curves of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

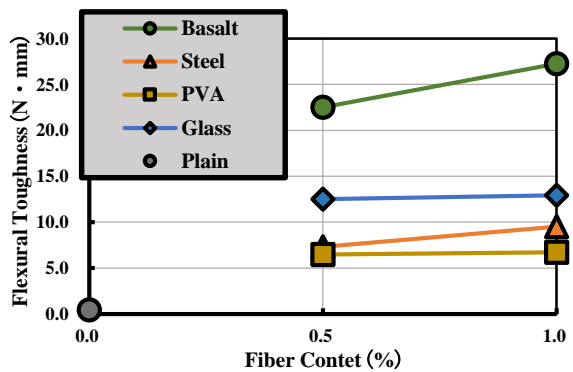


Fig.12 Flexural Toughness vs. Fiber Content of Basalt, Steel, PVA and Glass Fiber Reinforced Mortars

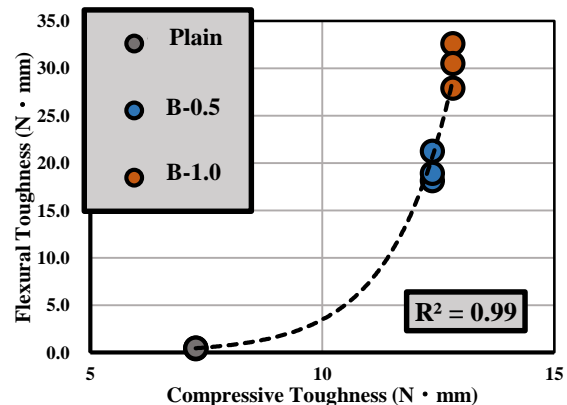


Fig.13 Flexural Toughness vs. Compressive Toughness of Basalt Fiber Reinforced Mortars

6. 結論

本研究では、実験を通して以下の知見が得られた。

- (1) フレッシュ時の性状は BFRM において、フロー値が著しく低下する傾向を示した。
- (2) BFRM は他の繊維補強モルタルと比較して、繊維混入率の増加は、空気量に及ぼす影響は小さい。
- (3) BFRM は高い圧縮強度と圧縮タフネスを発現したが圧縮強度においては繊維混入率の増加に伴い、減少する傾向にある。
- (4) BFRM において、圧縮試験及び曲げ試験による強度の標準偏差が低いことから繊維の分散性及び付着性が高い。
- (5) 繊維混入率の増加に伴い、引張強度が増加する傾向が確認された。
- (6) バサルト繊維は高いアスペクト比を有することから、モルタルの引張性能向上に寄与した。
- (7) バサルト繊維混入による曲げ強度の増進は低いが高い曲げタフネスの値を示した。

謝辞

本研究の実施に当たっては、バサルトアウス株式会社である鶴巢健治氏にご協力頂いた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリートー特性と応用ー，オーム社，1981
- 2) 石原明日子，大脇英司，新藤竹文，堺孝司：超高強度繊維補強コンクリートの適用による環境負荷低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1651-1656，2006
- 3) 岩下健太郎，佐藤大地，馬場進，松本信行：バサルト繊維シートコンクリートの付着特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1912-1917，2014
- 4) 佐藤大地，岩下健太郎，稲垣廣人，高見肇：エポキシ樹脂で付着確保した BFRP メッシュ補強モルタルの曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.307-312，2013
- 5) 岩下健太郎，馬場進，神崎豊祐，高見肇：BFRP シートを接着したコンクリート梁の高速荷重下での曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1621-1626，2015
- 6) V.Fiore, T.Scalici, G.Di Bella, A. Valenza : A review on Basalt fibre and its composites, Composites Part B 74 , pp.74-94, 2015
- 7) Vivek Dhand, Garima Mittal, Kyong Yop Rhee, Soo-Jin Park, David Hui : A Short review on basalt fiber reinforced polymer composites, Composites Part B 73 , pp.166-180, 2015
- 8) T.Bhat, V.Chevali, X.Liu, S.Feih, A.p.Mouritz : Fire structural resistance of basalt fibre composite , Composites Part A 71, pp.107-115, 2015
- 9) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典：PVA 短繊維を用いた早強コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.250-255，2012
- 10) 吉田 理沙，菊田 貴恒，西脇 智哉，三橋 博三：鋼繊維と合成繊維を混入した繊維補強セメント複合材料の引張性能に及ぼす鋼繊維形状の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.262-267，2012