

論文 PVA 繊維を添加した超軽量モルタルの特性に関する実験的研究

長谷川 聖史^{*1}・伊達 重之^{*2}・笠井 哲郎^{*3}

要旨:長さや直径の異なる数種類の PVA 繊維を添加した超軽量モルタルのフレッシュ性状, ならびに力学的特性について調査した。フレッシュ性状は練上り密度とモルタルフローについて, 力学的特性は圧縮強度および曲げ強度について評価した。また, 繊維の添加による靱性の向上を評価するために, 曲げタフネス試験も行った。その結果, 単位モルタル容積あたりの繊維総表面積が大きくなるほど, モルタルフローは小さくなる傾向にあった。一方, 曲げ強度については, 繊維総表面積が大きくなるほど高くなり, 繊維補強の効果が見られた。また, 圧縮強度に及ぼす繊維添加の影響はなかった。

キーワード: PVA 繊維, 超軽量モルタル, 気泡モルタル, 曲げ強度, 曲げ靱性

1. はじめに

超軽量モルタルによって製作された建築用パネル部材は, その軽量性から人力施工を可能にし, 現場における切削加工などが可能であるため多くの住宅に採用されている。

しかしながら, 一般のコンクリート部材と比較して, 製造時や保管時, 運搬時および施工時に作用するさまざまな衝撃によって, ひび割れ, 剥離・剥落, ならびに隅角部の欠けなどに細心の注意を払う必要がある。また, 切削加工を施した場合は, 切断面に用心鉄筋が露出するため防錆処理が不可避となっている。

一方, 近年では, 用心鉄筋を用いず, 繊維で補強することで, 軽量性を維持しながらも所要の曲げ強度や耐衝撃特性を確保することができるため, 外装用パネル部材にも多く利用されるようになった^{1), 2)}。これにより, 用心鉄筋を配置する必要がなくなり作業工程を短縮できる可能性があるなど, メリットは多い。補強用の繊維には, 鋼繊維のような錆の発生の心配がなく, 親水性に優れ, モルタルとの付着性が良好な PVA 繊維が有効であると考えられ, 著者らは注目してきた³⁾。この検討の過程で, その施工性や,

質量, ならびに強度特性等が, 単位モルタル容積あたりの繊維総表面積と高い相関性があることを明らかにした。

一方で, 補強効果には, 繊維とマトリックスとの付着特性のみならず, 繊維の長さも大きく影響を及ぼす⁴⁾。しかしながら, 著者らの既往の研究では³⁾, マトリックス強度は一定で, かつ長さが 8mm と 12mm の繊維での検討であった。したがって, 繊維総表面積での評価の有効性をより確かなものにするためには, マトリックスの強度を変えた場合や, より短い繊維を使用した場合の調査を行う必要がある。

そこで本研究では, 直径や長さの異なる数種類の PVA 繊維を添加した超軽量モルタルのフレッシュ性状, ならびに力学的特性について調査し, 繊維総表面積での評価の有効性について検討した。また, 養生方法を変えることによるマトリックス強度の違いが, 繊維の補強効果に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に, 使用した PVA 繊維の諸

*1 石川島建材工業 (株) 技術研究所 研究員 (正会員)

*2 石川島建材工業 (株) 技術研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 東海大学 工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	記号	備考
セメント	早強ポルトランドセメント	C	密度3.14g/cm ³ , 比表面積4550cm ² /g
細骨材	人工軽量細骨材	LS	真珠岩系, 絶乾密度1.17g/cm ³ , 24hr吸水率10.1%, 粗粒率3.00, 実積率42.1%, 絶乾状態で使用
混和剤	減水剤	Ad	ホリカルボン酸系高性能減水剤
	起泡剤	FF	アルキルエーテル系化合物, 希釈液(20倍希釈)を発泡倍率(泡容積/希釈液量)17倍程度にして使用
繊維	PVA繊維	VF	表-2参照

物性を表-2に示す。細骨材は、真珠岩系の人工軽量骨材を使用した。PVA 繊維は、直径が 40, 104, 209 μm の 3 水準、長さが 6, 8, 12mm の 3 水準を組み合わせた計 7 種類を使用した。

超軽量モルタルの配合を表-3に示す。超軽量モルタルは、予め起泡剤により製造した泡をモルタルに添加するプレフォーム方式で作製した。泡の添加量は、泡添加後のモルタル密度が 1.20g/cm³ となるように調整した。減水剤の添加率は、繊維添加前のモルタルフローが 265~280mm となるように定めた。PVA 繊維は 0.25~1.50vol%の範囲内で内割添加した。

なお、流動性や強度に及ぼす密度の影響を評価する目的で、密度を変えた繊維無添加モルタル (1.10, 1.00g/cm³) についても各種試験を行った。密度の調整はプレフォーム方式における泡の添加量を変化させて行った。

2.2 練混ぜ

PVA 繊維補強超軽量モルタルの練混ぜ手順を図-1に示す。人工軽量骨材の 24 時間吸水率に相当する水量を補正水として、練混ぜ水に加えて使用した。練混ぜには容量 60L のパン型ミキサーを使用した。

2.3 供試体の養生方法

水中養生の有無によるマトリックス強度の違いが繊維の補強効果に及ぼす影響を調べるために 2 通りの養生方法を行った。図-2に養生方法を示す。ひとつは、材齢 1 日で脱型し、20℃で 6 日間水中養生した後、20℃65%RH の恒温恒湿室にて 21 日間気中養生を行った。以後、この養生方法を (W→D) と記す。もう一方は、材齢 1 日で脱型後、20℃65%RH の恒温恒湿室にて 27 日間気中養生を行った。以後、この養生方法を (D) と記す。

表-2 PVA 繊維の諸物性

記号	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)
D40L6	40	6	1600	40	1.3
D40L8	40	8	1600	40	
D40L12	40	12	1600	40	
D104L6	104	6	1100	25	
D104L12	104	12	1100	25	
D209L6	209	6	1000	29	
D209L12	209	12	1000	29	

表-3 超軽量モルタルの配合条件

目標密度 (g/cm ³)	水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 s/c	減水剤添加率 Ad/C (%)	空気量 ^{※1} (%)
1.20	45.0	1.48	0.8	27.5
1.10				33.5
1.00				39.5

※1 泡添加後の目標空気量

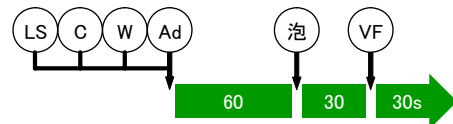


図-1 超軽量モルタルの練混ぜ手順

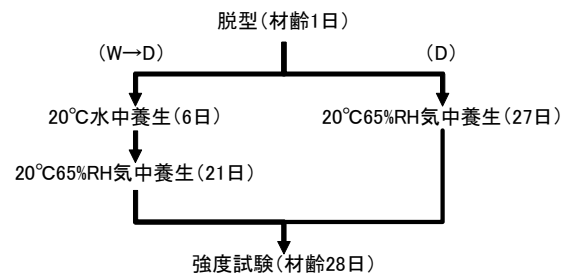


図-2 供試体の養生方法

2.4 試験項目

(1) フレッシュ性状

練上り密度ならびにモルタルフローを測定した。練上り密度の測定は JIS A 1116 に、モルタルフローの測定は JIS R 5201 のフロー試験に準拠してそれぞれ行った。

(2) 力学的特性

圧縮強度試験は、供試体の寸法をφ50×100mmとし、载荷はJIS A 1108に準拠した。

曲げ強度試験は、JIS A 1106に準拠した。供試体の寸法を40×40×160mmとし、スパン100mmの中央集中载荷とした。この際、試験装置のクロスヘッドに変位計を取り付け、曲げ载荷時の荷重-変位曲線を求め、たわみがスパンの1/150（本試験では0.67mm）となるまでの荷重-変位曲線下の面積（ T_b ）により曲げ靱性を評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

繊維添加率と練上り密度の関係を図-3に示す。なお、繊維の種類や量の違いによって巻き込まれる空気量も異なるため、配合上の繊維量と実際にモルタルに含まれる繊維量が異なる。従って図における繊維添加率は、式(1)から求めた実際の繊維添加率をプロットした。

$$V_{JR} = V_{JS} \times \frac{100 - Air_R}{100 - Air_S} \quad (1)$$

- ここに、 V_{JR} : 実際の繊維添加率(%)
- V_{JS} : 配合上の繊維添加率(%)
- Air_R : 実際の空気量(%)
- Air_S : 配合上の空気量(%)

直径が104μmの繊維(D104)に着目すると、長さによって低下の割合は異なるものの、繊維添加率が高くなるほど練上り密度は低下した。直径が209μmの繊維(D209)も同様の傾向が

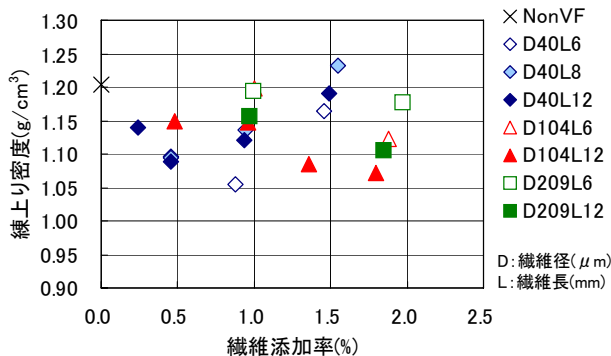


図-3 繊維添加率と練上り密度の関係

見られた。一方で、直径が40μmの繊維(D40)に着目すると、繊維添加率が高くなるほど練上り密度は低下する傾向にあるが、添加率が0.5%を超えると逆に練上がり密度は増大した。これは、繊維の直径や表面積の違いによる影響と考えられるが、詳しくは後述する。

繊維添加率とモルタルフローの関係を図-4に示す。図にはモルタルフローに及ぼす密度の影響を評価する目的で、繊維無添加で密度の異なる2種類のモルタルについてもプロットした。

繊維添加率が高くなるほどモルタルフローは小さくなる傾向にあった。一方で、繊維無添加の場合、密度の変化(0.90~1.20g/cm³)によるモルタルフローの影響は本実験の範囲内ではほとんど見られない(265~280mm)。繊維添加率を同一として密度を変化させた場合も同様の傾向を示すと考えられることから、繊維添加によるモルタルフローの低下は、密度の低減による影響ではなく、繊維とモルタルの接触摩擦による影響によるものと推察される。

接触摩擦は繊維-モルタル界面の面積に比例すると考えられる。そこで、各種フレッシュ性状と、(繊維一本あたりの表面積)×(単位モルタル容積あたりの繊維本数)で表される繊維総表面積の関係を整理した結果を図-5ならびに図-6に示す。繊維の直径あるいは添加率に拘らず、繊維総表面積が大きくなるほど密度は低下する傾向があり、単位モルタル容積あたりの繊維総表面積と練上り密度の間には相関性があった。密度低下の原因はPVA繊維添加後の練混ぜ

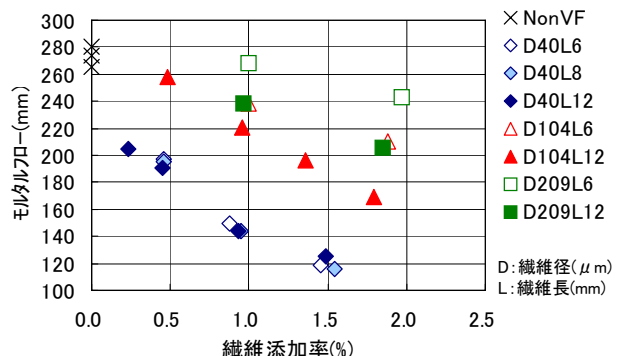


図-4 繊維添加率とモルタルフローの関係

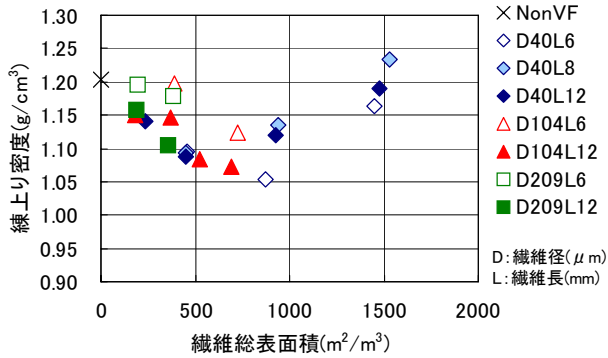


図-5 繊維総表面積と練上り密度の関係

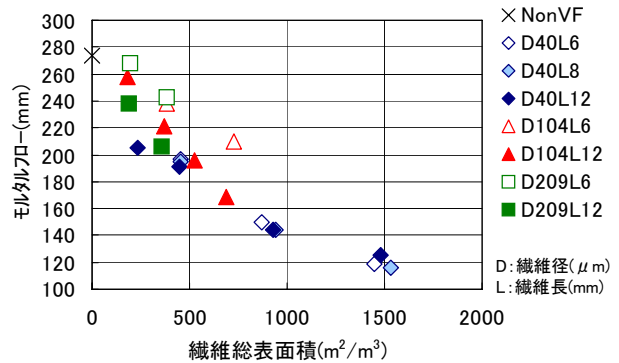


図-6 繊維総表面積とモルタルフローの関係

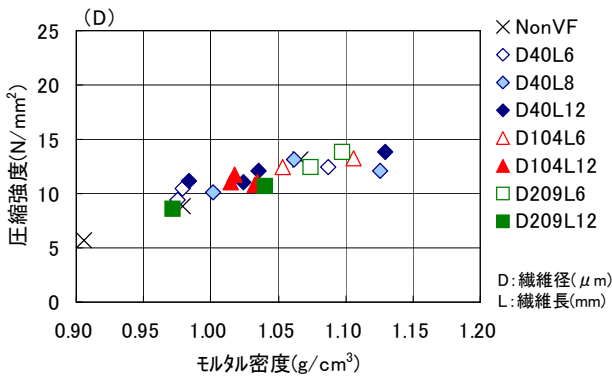
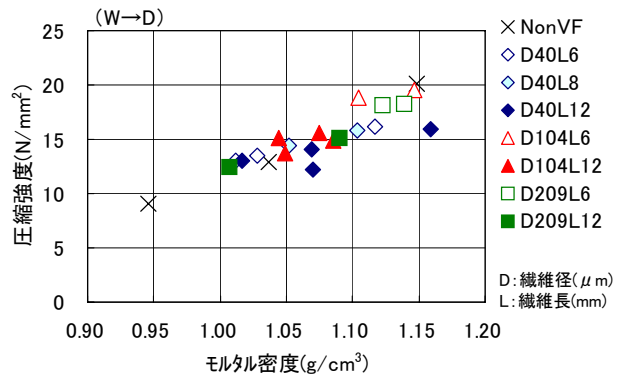


図-7 モルタル密度と圧縮強度の関係



時に発生する繊維の巻き込み空気の影響によるものと推察される。しかし、繊維総表面積がある範囲を超えると（本実験では約 $750\text{m}^2/\text{m}^3$ ）、逆に練上り密度は増大する傾向を示した。これは、繊維総表面積が過剰に大きくなると、繊維の分散が良好に行えない（繊維の絡み合いが多くなる）ため、空気の巻き込みが起こりにくくなるものと考えられる。

また、繊維総表面積とモルタルフローの関係においても相関性があり、繊維総表面積が大きくなるにつれて流動性は低下する傾向にあった。このことから、練上り密度や流動性に及ぼす繊維の影響は、繊維総表面積で評価することにより、従来の繊維添加率で評価する場合に比べてより明確な評価が可能となった。

3.2 力学的特性

モルタル密度と圧縮強度の関係を図-7 に示す。いずれの養生条件の場合においても、繊維の種類や添加率に拘らず、圧縮強度に及ぼすPVA 繊維の影響は見られなかった。図-8 は、養生条件別のモルタル密度と圧縮強度の関係を

示しているが、材齢初期に水中養生を施した（W→D）方が、相対的に高い圧縮強度を示した。

密度と曲げ強度の関係を図-9 に示す。繊維無添加のモルタル（NonVF）は密度の低下とともに曲げ強度も小さくなる傾向にあるが、繊維の種類によってはその傾向は見られない。

そこで、繊維添加率で曲げ強度を整理したものを図-10 に示す。ここでは、密度の減少が曲げ強度に与える影響を除くため、比強度（曲げ強度／密度）で整理している。

いずれの繊維においても、繊維添加率が高くなるほど比強度が高くなる傾向を示した。一方、繊維の直径が小さいものほど比強度は大きい傾向を示した。そこで、フレッシュ性状と同様に、比強度を繊維総表面積で整理した結果を図-11 に示す。繊維総表面積が大きくなるほど比強度は高くなり、繊維総表面積と比強度の間に相関性が見られた。しかしながら、気中養生（D）したモルタルに着目すると、長さが12mmと8mmの繊維を添加したモルタルはほぼ同じ線上にあるものの、6mmの繊維を添加したモルタルは同

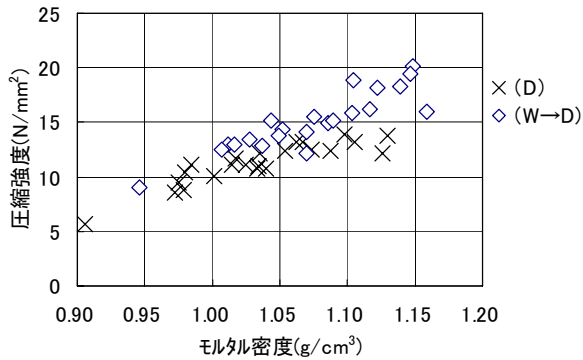


図-8 圧縮強度に及ぼす水中養生の影響

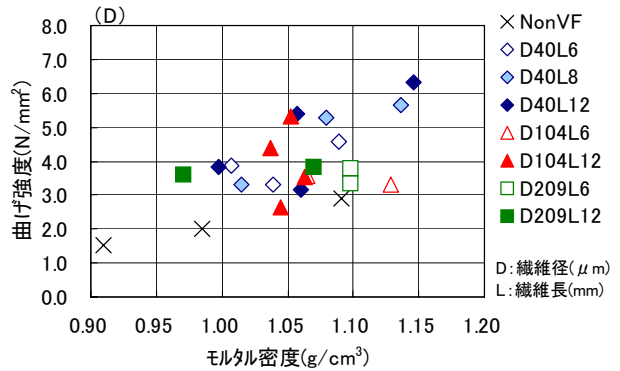


図-9 モルタル密度と曲げ強度の関係

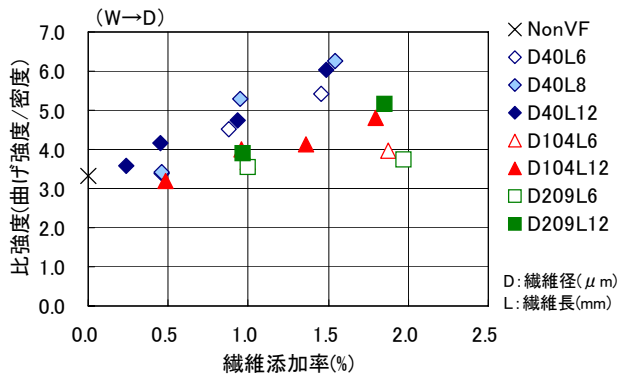
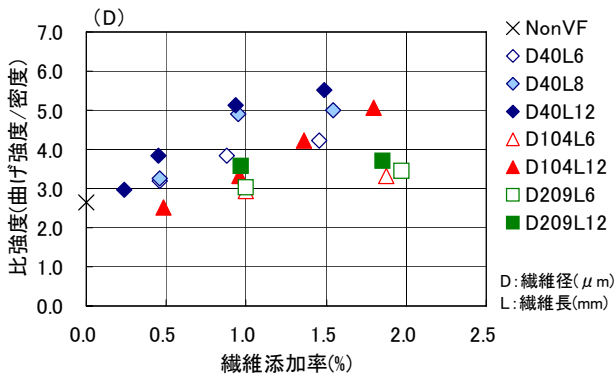


図-10 繊維添加率と比強度の関係

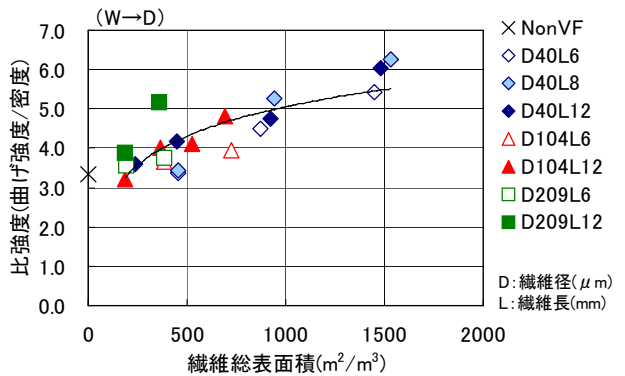
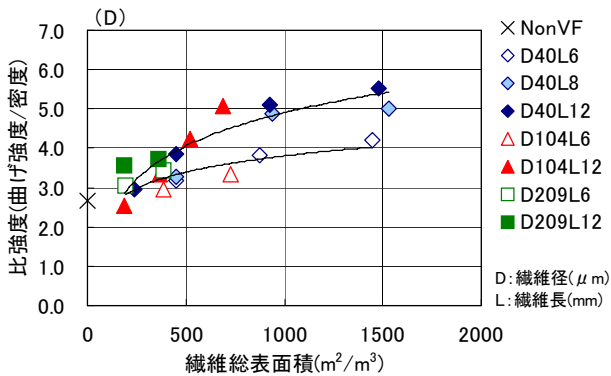


図-11 繊維総表面積と比強度の関係

一線上に乗らず、比較的低い値を示した。

繊維の強度に達する十分な埋め込み長がない場合、繊維は有効に働かない。これに対してある埋め込み長をを超えると、付着力が繊維の降伏強度を超えるために補強効果は有効に作用する⁴⁾。このことから気中養生の場合、限界繊維長（繊維が引き抜けずに破断点に達するのに必要な繊維長の最小値）が6mmから8mmの間に存在しているものと推察される。一方で、材齢初期に6日間水中養生(W→D)を施したモルタルは、いずれの繊維長においてもほぼ同じ線上にあった。このことから、材齢初期に水中養生を

行うことにより、マトリックスの強度が高くなり繊維とマトリックスの付着特性も改善されるため、限界繊維長が6mm以下になったものと考えられる。

曲げ挙動においては、繊維補強複合体では強度の増加だけでなく、靱性の増加も顕著に現れる。そこで、繊維総表面積で曲げ靱性を整理した結果を図-12に示す。繊維総表面積が大きくなるほど曲げ靱性は高くなり、繊維総表面積と曲げ靱性の間に相関性が見られた。また、比強度の場合と同様、材齢初期に水中養生(W→D)したモルタルは繊維長に拘らず繊維総表面積で

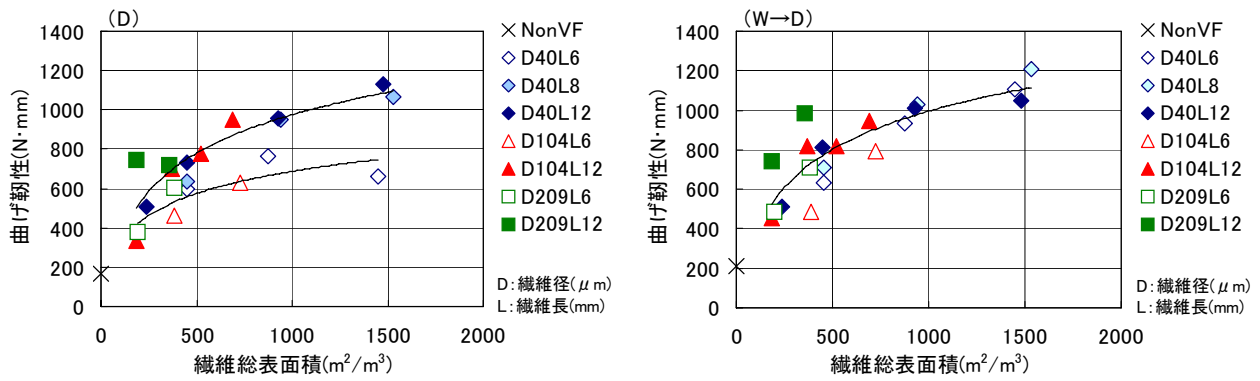


図-12 繊維総表面積と曲げ靱性の関係

一義的に表せたが、気中養生のみ(D)の場合は、長さが8mmと12mmの繊維を用いたモルタルはほぼ同じ曲線上にあるのに対し、6mmの繊維を用いたモルタルは比較的低い曲げ靱性であった。

強度特性に及ぼす因子としては、繊維径や添加率のほかにもアスペクト比や引張強度等が考えられるが、本実験の範囲内においては繊維総表面積によって簡易的に強度特性を評価できた。

なお、繊維総表面積の増大によって、曲げ強度や靱性は直線的に増加するものの、繊維総表面積がある値を超えると傾きが緩やかになる傾向が見られた。これは以下のように考察できる。

図-13に示すように、本来繊維総表面積が大きくなると曲げ強度や曲げ靱性も直線的に高くなる(点線)。しかし、繊維総表面積が大きくなるほど分散性は悪くなるため、均一に分散する繊維の割合は低くなり、実質の繊維総表面積が減少するものと推察される(一点鎖線)。この影響によって、繊維総表面積が大きくなるほど曲げ強度や曲げ靱性は高くなるものの、傾きは緩やかになると考えられる。

4. まとめ

PVA 繊維補強超軽量モルタルにおけるフレッシュ性状ならびに力学的特性について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 繊維総表面積と、練上り密度ならびに流動性との間に相関性があった。
- (2) 気中養生に比べて水中養生を施したモルタルは、繊維とマトリックスとの界面の付着強

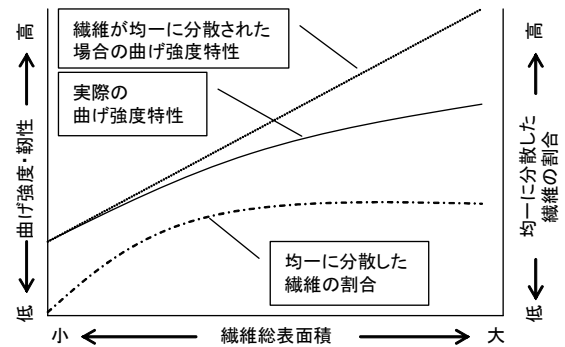


図-13 曲げ強度および曲げ靱性に及ぼす繊維の補強効果の概念図

度が向上し、限界繊維長は短くなる。

- (3) 限界繊維長以上の長さの繊維を用いたモルタルは、単位モルタル容積あたりの繊維総表面積によって、曲げ強度や曲げ靱性に及ぼす繊維の補強効果を一義的に評価できる。

参考文献

- 1) 室賀陽一郎, 伊達重之: PVA 繊維補強超軽量モルタルに関する研究, 石川島播磨技報, Vol.44, No.2, pp.122-216, 2004.
- 2) 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用, pp.4-7, 2005.
- 3) 長谷川聖史, 伊達重之, 末森寿志, 笠井哲郎: PVA 繊維補強軽量モルタルの耐衝撃特性, コンクリート年次論文集, Vol.28, No.1, pp.365-370, 2006.
- 4) 真嶋光保, 幸左賢二, 大野定俊: 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版, 1994.