

論文 ビニロン繊維補強軽量モルタルの耐衝撃特性

長谷川 聖史^{*1}・伊達 重之^{*2}・末森 寿志^{*3}・笠井 哲郎^{*4}

要旨: 長さや直径の異なる数種類のビニロン繊維で補強した軽量モルタルのフレッシュ性状, ならびに耐衝撃特性に及ぼす繊維の特性の影響を調査した。フレッシュ性状は練上り密度とモルタルフローによって, 耐衝撃特性はシャルピー衝撃試験による衝撃強度によって評価した。その結果, 繊維径が小さくなるほど, 繊維添加率が高くなるほど練上り密度, モルタルフローはそれぞれ小さくなった。また, 耐衝撃特性が向上する傾向にあった。さらに, 繊維一本あたりの表面積と単位モルタル容積あたりの繊維本数の積で表される繊維総表面積と, フレッシュ性状ならびに耐衝撃特性との間に高い相関関係があることがわかった。

キーワード: ビニロン繊維, 軽量モルタル, 超軽量モルタル, 気泡モルタル, 耐衝撃特性

1. はじめに

建築用の非構造用パネル部材においては, パネルの質量を軽減することを目的として軽量コンクリートもしくは軽量モルタルが用いられる。これらは, 一般に高い強度を必要としないため, 剥落防止用に用心鉄筋を配置しただけの構造も多い。中でも, 超軽量気泡モルタルによって製作されたパネル部材は, 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¹⁾。

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, 高靱性を有する繊維補強セメント複合材料や複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料²⁾などが注目されており, 建築分野での利用のみならず, 土木分野における補修・補強目的の利用も期待されている³⁾。

外装用パネル部材においても, 繊維で補強することにより, 軽量性を維持しながらも耐衝撃特性の高い複合材料とすることができる。また, 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。繊維には, 鋼繊維のような錆の発生の心配がなく, かつ親水性に優れ, モルタルとの付着性が良好なビニロン繊維が有効であると考えられ, 著者らは注目してきた⁴⁾。しかしながら, ビニロン繊維で補強した軽量モルタルの耐衝撃特性について研究した事例はほとんどない。

そこで本研究では, ビニロン繊維を添加した軽量モルタルのフレッシュ性状, ならびに耐衝撃特性に及ぼすビニロン繊維の補強効果について検討を行った。耐衝撃特性については, シャルピー衝撃試験における衝撃強度によって評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究では, 密度が $1.5 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ の軽量モルタルと, 密度が $0.9 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ の超軽量モルタル

*1 石川島建材工業 (株) 技術研究所 (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 (株) クラレ 繊維資材カンパニー産資開発部 (正会員)

*4 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 $3.14\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $4550\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	人工軽量細骨材(S)	ML	膨張頁岩系、表乾密度 $1.92\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率14.0%、粗粒率2.74、実積率56.8%、湿潤状態で使用
		KP	真珠岩系、絶乾密度 $1.17\text{g}/\text{cm}^3$ 、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	ポリカルボン酸系高性能減水剤
	増粘剤	VA	非イオン系水溶性セルロース
	起泡剤	FF	硝酸エステル系化合物、希釈液(10倍希釈)を発泡倍率(泡容積/希釈液量)20倍程度にして使用
繊維	ビニロン繊維(VF)	VF40-8	密度 $1.30\text{g}/\text{cm}^3$ 、繊維径 $40\mu\text{m}$ 、繊維長8mm、引張強度 $1600\text{N}/\text{mm}^2$ 、弾性係数 $40\text{kN}/\text{mm}^2$
		VF40-12	密度 $1.30\text{g}/\text{cm}^3$ 、繊維径 $40\mu\text{m}$ 、繊維長12mm、引張強度 $1600\text{N}/\text{mm}^2$ 、弾性係数 $40\text{kN}/\text{mm}^2$
		VF100-12	密度 $1.30\text{g}/\text{cm}^3$ 、繊維径 $100\mu\text{m}$ 、繊維長12mm、引張強度 $1100\text{N}/\text{mm}^2$ 、弾性係数 $40\text{kN}/\text{mm}^2$

それぞれについて、ビニロン繊維による補強効果を検討した。

使用材料を表－1に示す。細骨材は、軽量モルタルにおいては膨張頁岩系を、超軽量モルタルにおいては真珠岩系を使用した。ビニロン繊維は長さや直径の異なる3種類の繊維を使用した。

軽量モルタルの配合を表－2に示す。増粘剤は繊維の分散性向上を目的として加えた。

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。

それぞれのモルタルにおける減水剤の添加率は、繊維添加前のモルタルフローが $260\pm 1.5\text{mm}$ となるように決めた。

なお、軽量モルタルならびに超軽量モルタルとも、ビニロン繊維は概ね0.5vol%～2.0vol%の範囲内でモルタルに対して内割添加した。

2.2 練混ぜ

モルタルの練混ぜ手順を図－1に示す。

超軽量モルタルについて、人工軽量骨材(KP)の24時間吸水率(10.1%)に相当する水量を補正水として、予め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、練混ぜ量は17Lとした。

2.3 試験項目

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状は、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に従った。また、モルタルフローの測定はJIS R 5201のフロー試験に従った。

(2) 耐衝撃特性

繊維補強モルタルの耐衝撃特性を評価するた

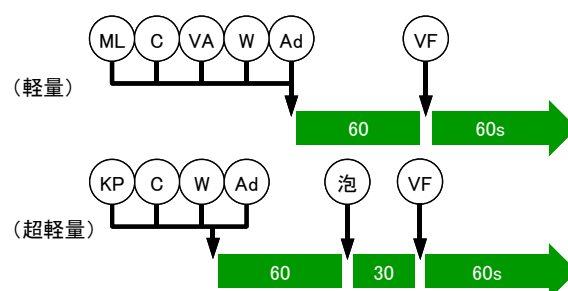
表－2 軽量モルタルの基本配合条件

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 s/c	減水剤添加率 Ad/C (%)	増粘剤添加率 VA/C (%)	空気量 (%)
45.0	1.70	0.4	0.1	8.5

表－3 超軽量モルタルの基本配合条件

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 s/c	減水剤添加率 Ad/C (%)	増粘剤添加率 VA/C (%)	空気量 (%)
48.0	1.89	0.6	0.0	25.0

※1 モルタルの空気量が25%となるように予め作製した泡の量を調整



図－1 モルタルの練混ぜ方法

めに、建築用ボード等に用いられる衝撃試験(JIS A 1408)が行われるケースがある。しかしながらこの試験方法は、おもり落下時のリバウンドの影響が大きく、比較的低強度なモルタルの耐衝撃特性の評価を定量的に判断するのは困難である。そこで、ビニロン繊維補強複合材料の耐衝撃特性を簡易的に評価するために、プラスチックの強度測定で用いられているシャルピー衝撃試験を行った。シャルピー衝撃試験はJIS K 7111に準拠して行った。試験の原理は、シャルピー衝撃試験機に試験片を単純支持ばりの状態で支持し、その中央を回転ハンマによって衝撃し、その衝撃によって試験片を破断させるときに使われた吸収エネルギーを測定し、その吸収エネルギーから算出される衝撃強度によって耐

衝撃特性を評価するものである（図－2）。衝撃強度は式(1)によって求めた。

図－3 に試験片の作製方法と寸法を示す。試験片は 400×30×116mm の平板から切削加工して作製し、その寸法は 10×15×116mm（幅×厚さ×長さ）とした。なお、打撃方向は、仕上げ面と反対の面（型枠面）とした。試験片の個数は 10 本とし、材齢 12 日まで型枠のまま封緘養生し、脱型後気中養生（20℃65%RH）を行い材齢 14 日で試験を行った。

$$IS = \frac{E}{b \times d} \times 1000 \tag{1}$$

ここに、IS：衝撃強度（kJ/m²）

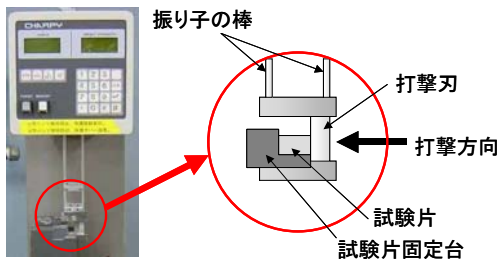
E：吸収エネルギー（J）

b：試験片の幅（mm）

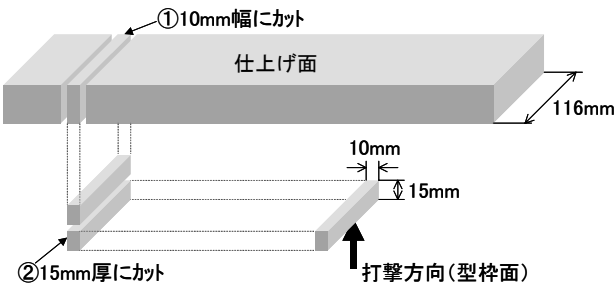
d：試験片の厚さ（mm）

3. 実験結果および考察

表－4 にフレッシュ性状ならびにシャルピー衝撃試験結果を示す。なお、流動性や耐衝撃特性に及ぼす密度の影響を評価する目的で、軽量モルタルならびに超軽量モルタルとも、繊維無添加で密度のみ異なる 3 種類のモルタルについても試験を行った。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。



図－2 シャルピー衝撃試験装置



図－3 試験片の作製方法と寸法

3.1 フレッシュ性状

繊維添加率と練上り密度の関係をモルタルの種類別に図－4 に示す。なお、繊維の添加によって練上り密度が異なった場合、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ことが予想される。従って図における繊維添加率は、配合上の添加率ではなく、測定空気量から換算して求めた単位モルタル容積中に含まれる実際の繊維添加率をプロットした。

いずれのモルタルにおいても、繊維添加率が高くなるほど練上り密度は低下する傾向（空気量は増加する傾向）にあった。繊維を 1.5% 添加することによる計算上のモルタル密度の低下は、軽量モルタルの場合で 0.01g/cm³、超軽量モルタルの場合で 0.005g/cm³ 程度でしかない。したがって、大幅な密度低下の原因はビニロン繊維添加後の練混ぜ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。すなわち、繊維添加率が高いほど繊維とモルタルとの接触が多くなり、それによって巻き込まれる空気量が多くなることから、練上り密度が小さくなるものと考えられる。

表－4 フレッシュ性状と衝撃試験結果

モルタル（骨材）の種類	繊維		練上り密度 (g/cm ³)	測定空気量 (%)	モルタルフロー (mm)	繊維添加率※ (%)	衝撃強度 (kJ/m ²)
	種類	添加率 (%)					
軽量 (ML)	—	0.00	1.76	7.4	263	0.00	1.17
	VF40-8	0.50	1.65	13.1	202	0.48	2.57
	VF40-8	1.00	1.58	16.6	178	0.91	3.63
	VF40-8	1.50	1.53	19.1	156	1.33	4.26
	VF40-8	2.00	1.48	21.6	150	1.71	4.37
	VF40-12	0.50	1.63	14.1	199	0.47	3.12
	VF40-12	1.00	1.56	17.6	170	1.10	4.01
	VF40-12	1.50	1.51	20.2	158	1.31	3.76
	VF100-12	1.00	1.73	8.7	240	1.00	2.93
	VF100-12	1.50	1.67	11.7	212	1.45	3.67
	—	0.00	1.67	12.2	270	0.00	1.21
	—	0.00	1.53	19.5	270	0.00	1.11
	—	0.00	1.37	27.9	260	0.00	1.03
	—	0.00	1.20	25.5	256	0.00	0.79
	VF40-8	0.50	1.05	34.7	192	0.44	2.85
超軽量 (KP)	VF40-8	1.00	0.97	39.6	157	0.81	3.06
	VF40-12	0.50	1.00	37.8	188	0.41	2.27
	VF40-12	1.00	0.96	40.2	163	0.80	2.90
	VF40-12	1.25	0.87	45.7	153	0.91	2.85
	VF40-12	1.50	1.13	29.6	125	1.41	3.44
	VF100-12	1.00	1.12	30.3	235	0.93	1.89
	VF100-12	1.50	1.01	37.0	191	1.26	2.95
	—	0.00	1.13	29.8	256	0.00	0.84
	—	0.00	1.02	36.7	270	0.00	0.66
	—	0.00	0.90	44.1	248	0.00	0.69

※ 測定空気量から求めた単位モルタル容積中に含まれる実際の添加率

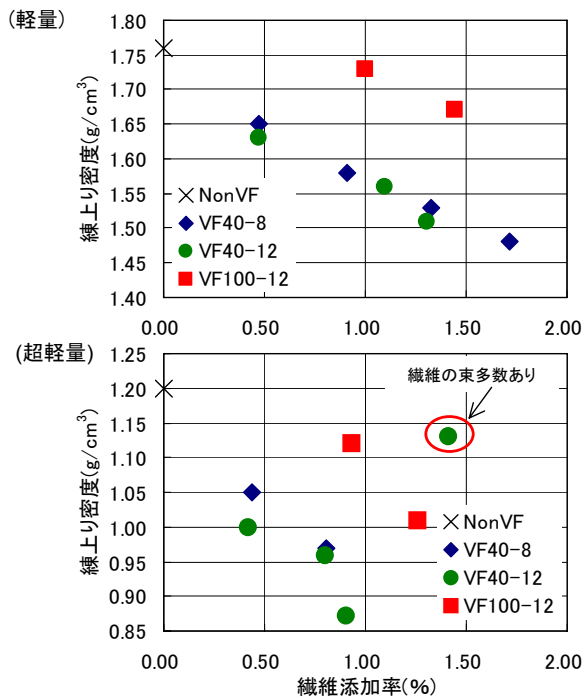


図-4 繊維添加率と練上り密度の関係

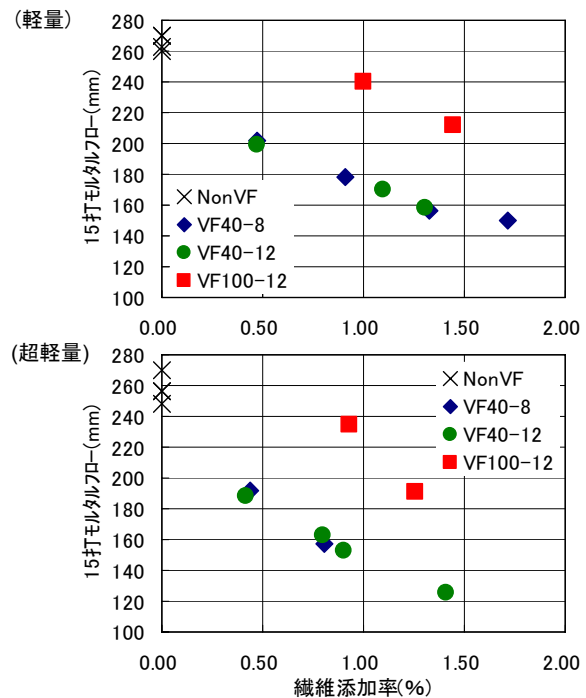


図-5 繊維添加率とモルタルフローの関係

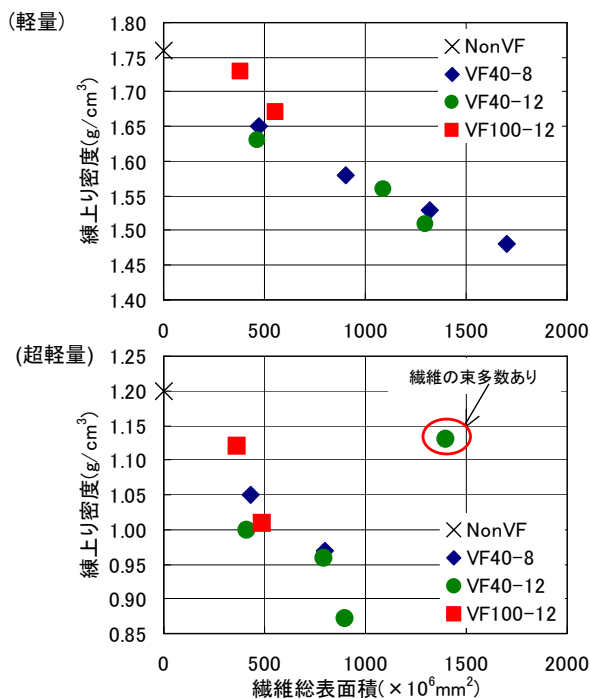


図-6 繊維総表面積と練上り密度の関係

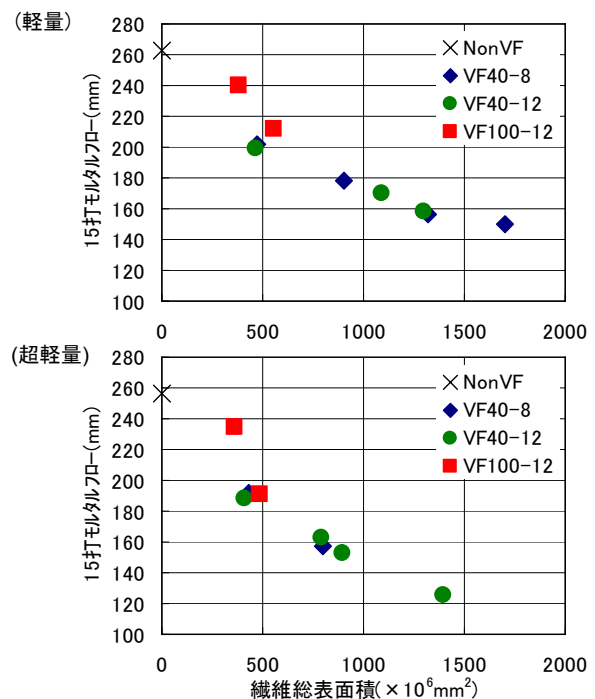


図-7 繊維総表面積とモルタルフローの関係

しかしながら、繊維径が $40\mu\text{m}$ で繊維長が 12mm の繊維 (VF15-12) を 1.5% 添加した超軽量モルタルにおける練上り密度のみが傾向と異なる結果となっている。このモルタルのモルタルフローは 125mm と非常に流動性が低く、繊維の分散性についても、繊維の束が多く見られる

など良好とは言えない状態であった。このことから、繊維の量が極端に多い場合、練混ぜが良好に行えないため前述したような繊維とモルタルの接触による空気の巻き込みが行われにくいものと推察される。著者らの研究⁵⁾でも明らかにように、モルタルの密度が小さいと練混ぜ時に

繊維が受けるせん断力が小さくなるため繊維の分散性は低下する傾向にある。したがって、モルタルの密度が小さい場合には繊維の分散状況について留意する必要がある。

繊維添加率とモルタルフローの関係をモルタルの種類別に図-5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3種類のモルタルについても示した。繊維添加率が高くなるほどモルタルフローは小さく、流動性は低下する傾向にあった。一方で、繊維無添加の場合、密度の変化（軽量モルタルの場合 $1.37\sim 1.76\text{kg/m}^3$ ，超軽量モルタルの場合 $0.90\sim 1.20\text{kg/m}^3$ ）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かった。このことから、繊維添加率が高くなること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。すなわち、繊維添加率が高くなるほど、繊維とモルタルとの接触面積が多くなるため摩擦が大きくなり、そのために流動性が低下したものと考えられる。

一方で、いずれのモルタルにおいても、ビニロン繊維の繊維径が細いものほど練上り密度は小さく（空気量は大きく）、モルタルフローも小さくなる（流動性は低下する）結果となった。これは、繊維径が細いものほど比表面積が大きくなるためであると考えられる。すなわち、このことは単位モルタル容積あたりの繊維の総表面積が大きくなったことに起因しているものと考えられる。そこで、各種フレッシュ性状に関して、（繊維一本あたりの表面積） \times （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で整理したものを、図-6ならびに図-7に示す。図に示すように、繊維の種類あるいは添加率に拘らず、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高い相関関係があり、繊維総表面積が大きくなるほど練上り密度は小さくなる傾向にあることがわかった。また、繊維総表面積とモルタルフローの関係に

おいても、同様に繊維総表面積と高い相関関係にあり、繊維総表面積が大きくなるにつれてモルタルフローは小さく、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

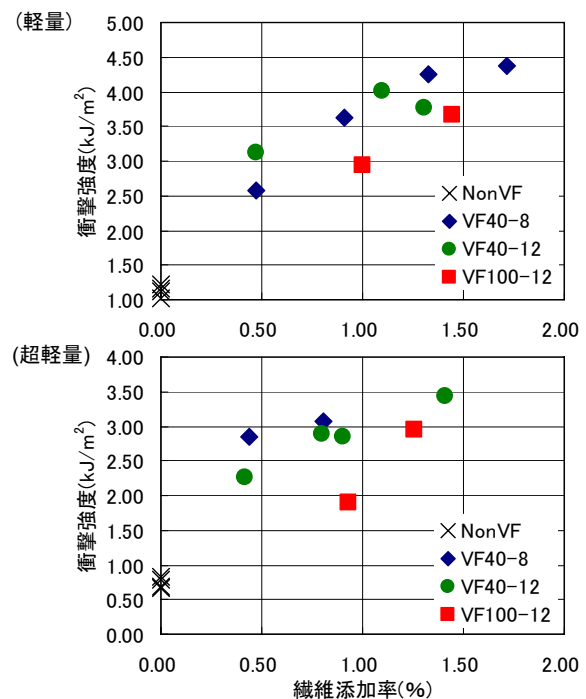


図-8 繊維添加率と衝撃強度の関係

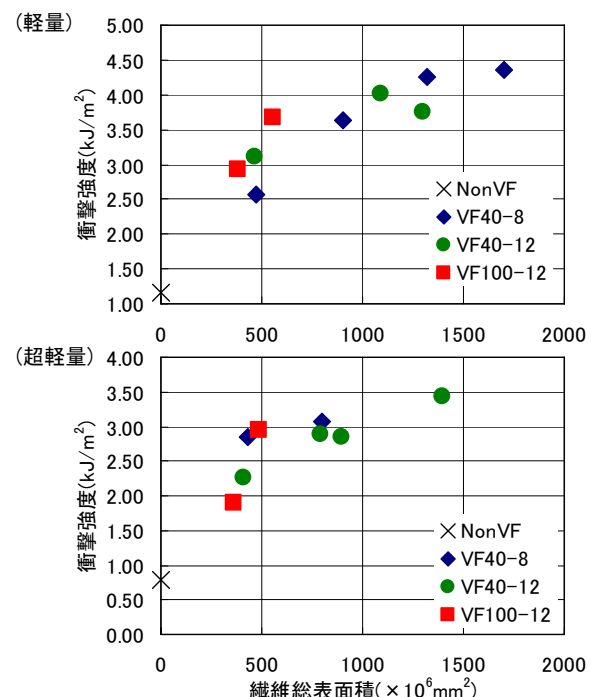


図-9 繊維総表面積と衝撃強度の関係

合に比べてより明確な評価が可能である。

3.2 耐衝撃特性

繊維添加率と衝撃強度の関係をモルタルの種類別に図-8に示す。図には衝撃強度に及ぼす密度の影響を評価することを目的に、繊維無添加で密度の異なる3種類のモルタルについても示した。密度の変化（軽量モルタルの場合 1.37～1.76kg/m³，超軽量モルタルの場合 0.90～1.20kg/m³）が衝撃強度に与える影響は本実験の範囲内ではほとんど見られなかった。

いずれのモルタルにおいても、繊維添加率が高くなるほど衝撃強度は高くなる傾向にあった。また、同一添加率において、細い繊維を使用したモルタルほど衝撃強度は高くなっている。

フレッシュ性状の場合と同様に、衝撃強度においても繊維総表面積での検討を行った。図-9に繊維総表面積と衝撃強度の関係をモルタルの種類別に示す。いずれのモルタルにおいても、衝撃強度と繊維総表面積とは非常に高い相関関係にあり、耐衝撃特性においても繊維総表面積で評価できることが明らかとなった。繊維の総表面積が大きくなるほど繊維とモルタル界面の接触面積が大きくなり、その結果付着力が大きくなると考えられ、その付着力の増加が衝撃強度を高めているものと推察される。強度に及ぼす因子としては、繊維径や添加率のほかにも繊維のアスペクト比や繊維長⁶⁾、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耐衝撃特性を評価できることが明らかとなった。

4. まとめ

ビニロン繊維補強軽量モルタルにおけるフレッシュ性状ならびに耐衝撃特性に及ぼす繊維の補強効果について調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 繊維添加率が高くなるほど練上り密度は小さくなり、流動性は低下する傾向にあった。
- (2) 繊維長にかかわらず、細い繊維を使用したもののほど同一添加率における練上り密度は小

さく、かつ流動性は低下する傾向あった。

- (3) 繊維総表面積と、練上り密度ならびに流動性との間に高い相関関係があった。
- (4) 繊維添加率が高くなるほど、かつ繊維径が細くなるほど、耐衝撃特性は向上した。
- (5) 繊維総表面積が大きくなるほど付着力が大きくなるため、耐衝撃特性は改善された。
- (6) 繊維一本あたりの表面積と単位モルタル容積中の繊維の本数で表される繊維総表面積によって、練上り密度や流動性および耐衝撃特性に及ぼす影響をより明確に評価できた。

本研究により、施工性や質量、そして耐衝撃特性と単位モルタル容積あたりの繊維総表面積の関係が明らかになったことから、目的とする性能を得るための繊維の種類と添加率を容易に推定することが可能となった。

参考文献

- 1) 室賀陽一郎，伊達重之：ビニロン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，2005.
- 3) 国枝稔，宮田良大，鎌田敏郎，六郷恵哲：断面修復材の靱性が補修部材のひび割れ分散性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1517-1522，2003.
- 4) 伊達重之，長谷川聖史，前田拓郎，末森寿志，小川敦久：ビニロン繊維補強超軽量モルタルの強度に関する基礎的研究，日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工，Vol.2004，pp.1065-1066，2004.
- 5) 江口義之，室賀陽一郎，伊達重之：短繊維補強超軽量モルタルに関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，Vol.58，pp.1109-1110，2003.
- 6) 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.