

ビニロン繊維補強超軽量モルタルに関する研究

Fundamental Study on Vinylon Fiber Reinforced Super Lightweight Mortar

室 賀 陽一郎 石川島建材工業株式会社技術研究所技術グループ
伊 達 重 之 石川島建材工業株式会社技術研究所技術グループ 課長代理

ビニロン繊維補強超軽量モルタルの軽量建築素材への活用の可能性を検討するため、起泡剤を活用した超軽量モルタルをベースに、ビニロン繊維添加による補強効果を調査した。この結果、普通モルタルに比較して、超軽量モルタルの弾性係数は小さいので、繊維による補強効果は高い。また、補強効果の発現においては、繊維の分散（ばらけ）状態が重要であり、これにはサイジングの程度と繊維径が影響する。また、集合住宅向け外壁材へのビニロン繊維補強超軽量モルタルの適用例を紹介する。

Practical use of vinylon fiber for lightweight building members was examined, and the effect on reinforcement by vinylon fiber of super lightweight mortar (VFRM) using gas forming agent was evaluated. The results obtained are as follows. VFRM with lightweight mortar shows high effect on reinforcement compared to normal weight mortar. The reason seems to be that the Young's modulus ratio of VFRM with lightweight mortar is smaller than that of normal weight mortar. The effect of reinforcement depends on dispersion of the fiber, degree of sizing, and aspect ratio of the fiber. An application of VFRM for outer wall members of an apartment is introduced.

1. 緒 言

錆やアルカリに対する抵抗性が高い有機繊維のなかでも、比較的弾性係数の高いビニロン繊維は、ほかの有機繊維にない良好な親水性を示す。このため、コンクリートの補強材としての適用事例⁽¹⁾が多く、超軽量コンクリート（モルタル）と組み合わせることで断熱性に優れた軽量プレキャストカーテンウォールへの利用が検討されている。

本稿では、前述の軽量建築部材への活用の可能性を検討するため、起泡剤を用いた超軽量モルタル⁽²⁾をベースに、ビニロン繊維添加による補強効果の調査を目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料、特性、調合、実験要因

使用材料を第1表に、ビニロン繊維の特性を第2表に、ベースモルタルの調合（密度約 0.9 g/cm³）を第3表に示す。そして第4表には実験要因を示す。第2表に示すビニロン繊維の特性について、サイジングとは、練混ぜ時の繊維同士の絡みを防ぐために繊維をあらかじめ部分的に収束（束ねる）させておくことであり、表中の「サイジングの程度」とは、収束させるためののり付けの程度を示す。表中「non」は収束させていないタイプであり、「soft」、「middle」の順に収束の程度が強くなる。細骨材には粒度の異なる廃ガラス発泡

細骨材 2 種類をあらかじめブレンドし、練混ぜ時にそれぞれの骨材が吸水する水量を補正水（約 17 kg/m³）として別途

第1表 使用材料

Table 1 Materials

材 料	記 号	種 類	比 重	吸水率（%）
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.14	—
細骨材 1	S1	廃ガラス発泡細骨材	0.70	5.5
細骨材 2	S2	廃ガラス発泡細骨材	0.65	5.5
減水剤	Ad	ポリカルボン酸系高性能減水剤	—	—
起泡剤	AE	アニオン系界面活性剤	—	—

第2表 ビニロン繊維の特性

Table 2 Characteristics of vinylon fiber

繊 維 記 号	F1	F2	F3	F4
密 度 (g/cm ³)	1.3			
繊 維 径 (mm)	27 × 10 ⁻³	40 × 10 ⁻³	100 × 10 ⁻³	130 × 10 ⁻³
繊 維 長 (mm)	6	12		
アスペクト比 (—)	222	300	120	92
引 張 強 度 (N/mm ²)	1 600		1 100	
引 張 弾 性 率 (kN/mm ²)	37	40	25	
サイジングの程度	non	soft	middle	

第3表 ベースモルタルの調合

Table 3 Mixing proportion of base mortar

W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S1	S2
45	25	171	380	223	89

第 4 表 実験の要因と水準
Table 4 Parameters and levels of tests

要 因	単 位	水 準
繊維の種類	—	4 種類
繊維添加率	vol%	0, 0.5, 1.0, 1.5
モルタル密度	g/cm ³	0.7, 0.9

添加した。また、起泡剤は原液を 10 倍に希釈して用いた。

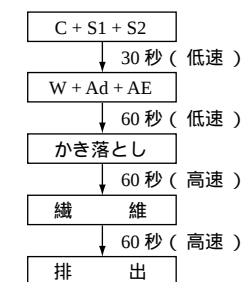
2.2 練混ぜおよび養生

練混ぜは公称容量 20 リットルのホバートミキサを用いて第 1 図に示す要領で実施した。モルタルの繊維添加前後における密度が目標値となるよう、起泡剤の添加率をセメント重量の 0.1～1.1% (原液ベース) の範囲で適宜調整した。また、減水剤添加率はモルタルの密度が 0.7 g/cm³ の場合で 1.2%, 同じく密度が 0.9 g/cm³ の場合で 0.9% 添加した。練混ぜ後、直ちに曲げ強度測定用として 40×40×160 mm 角柱の供試体を作製した。

供試体は打設後、20～60%RH の雰囲気中で型枠養生とし、材齢 3 日で脱型し、その後は同じ雰囲気中でそのまま気乾養生とした。

3. 実験結果

第 5 表にフレッシュモルタルの物性と 4 種類の繊維 (繊維添加率 0.5 vol%) の分散性ならびにモルタルフローを示す。また、モルタル中から取り出した繊維の分散状態を第 2 図に示す。繊維の分散性は、フレッシュモルタル (約 500 g) を 2.5 mm メッシュ上でペースト部分を洗い流し、残った繊維の分散状況を確認した。ペースト部分を洗い流す際は、その作業によって繊維の分散状態が変わらないように留意した。モルタル密度が 0.7 g/cm³ の場合では F1 および F2 は分散することが確認されたが、F3 および F4 ともに練混ぜ後も繊維束が多く見られた。一方、モルタル密度が 0.9 g/cm³ の場合では 0.7 g/cm³ の場合よりも分散性は向上したが、部分的に繊維の束が観察された。今回の実験条件では、モルタル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



第 1 図 練混ぜ方法
Fig. 1 Mixing process

第 5 表 フレッシュモルタルの物性
Table 5 Properties of fresh mortar

モルタル密度 (g/cm ³)	繊維記号	分散性	15 打フロー (mm)
0.7	F1		170
	F2		180
	F3	×	190
	F4	×	190
0.9	F1		137
	F2		119
	F3		230
	F4	○	240

(注) 分散性の判定基準

：繊維束が全く見られない

：繊維束 3 割未満

○：繊維束 1 割未満

×：繊維束 5 割以上

(a) 繊維 F2

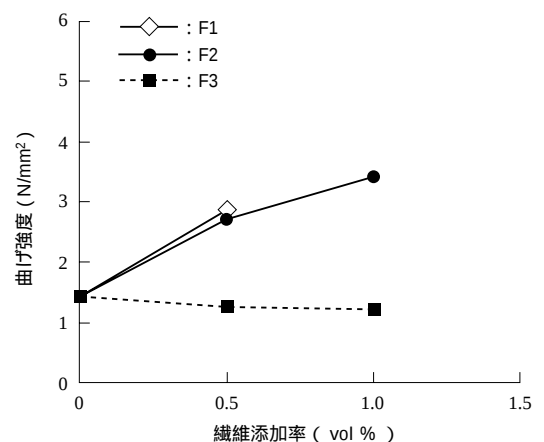
(b) 繊維 F3



第 2 図 繊維の分散状態
Fig. 2 Fiber dispersion

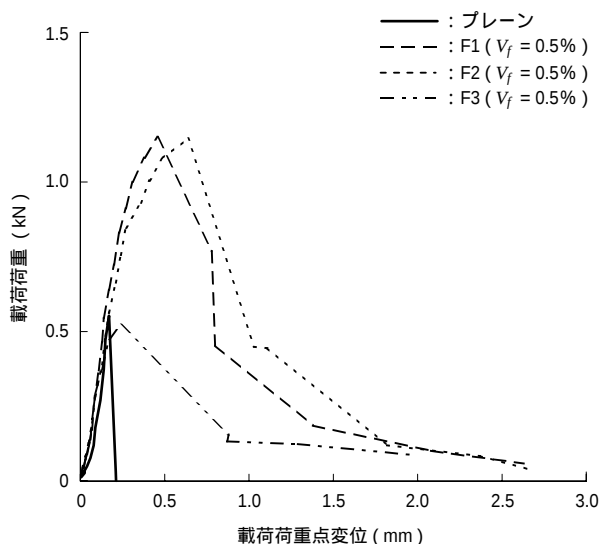
ため、収束の程度が高い繊維 (F3, F4: 第 2 表参照) では繊維がばらけにくくなることが推察される。また、収束程度が同じ場合でも、太径の繊維は比表面積が小さいため分散しやすい傾向にあるものと考えられる (第 5 表のモルタル密度 0.9 g/cm³ 参照)。

モルタル密度 0.7 g/cm³ の場合の曲げ強度に及ぼす繊維の添加率の影響を第 3 図に、そのときの載荷荷重と載荷荷重点変位の関係を第 4 図に示す。なお、モルタル密度



(注) モルタル密度: 0.7 g/cm³

第 3 図 曲げ強度に及ぼす繊維の添加率の影響
Fig. 3 Effect of fiber content on bending strength of mortar (Density of mortar: 0.7 g/cm³)



(注) モルタル密度 : 0.7 g/cm³

第 4 図 載荷荷重と載荷荷重点変位の関係

Fig. 4 Relationship between load and displacement at load point (Density of mortar : 0.7 g/cm³)

0.7 g/cm³ の場合, F4 は著しく繊維の分散 (ばらけ) 状態が悪かったことから曲げ試験を実施しなかった. F1 および F2 については補強の効果が認められたものの, F3 については繊維を添加することで強度は低下し, 補強の効果が確認されなかった. この原因はモルタル中の繊維の分散状態の違いによるものと推察される. また, いずれの繊維においてもひび割れ発生荷重と最大荷重がほぼ等しい値となった. ひび割れ発生応力は繊維添加率 (V_f) とマトリックスと繊維の弾性係数比を用いて次の (1) 式で求めることができる⁽³⁾.

$$\sigma_{ccr} = \sigma_m \{1 + V_f \times (E_f / E_m - 1)\} \dots\dots\dots (1)$$

- σ_{ccr} : ひび割れ発生応力 (N/mm²)
- σ_m : マトリックスの強度 (N/mm²)
- V_f : 繊維添加率 (%)
- E_f : 繊維の弾性係数 (N/mm²)
- E_m : マトリックスの弾性係数 (N/mm²)

既往の研究事例⁽¹⁾と比較して, わずか 0.5 vol% の繊維添加率でも, 高い強度比 (複合材の強度 / プレーンの強度) を示したのは, マトリックスが超軽量モルタルであり, 弾性係数比 (E_f / E_m) が高くなったことによるものと推察される. また, 繊維のアスペクト比 (繊維の長さとの比) が大きいものほど複合材の強度は高くなる⁽³⁾. 繊維の特性について, F1 は F2 に比較して弾性係数のみならずアスペクト比も小さいが, F2 モルタルと同等の強度比を示した. 曲げ強度は最大骨材径の影響も受け, 繊維長との比が 0.5 のときに最大強度を示す⁽³⁾ことから, 今回のケ

ース (最大骨材径 2.5 mm) では F1 の繊維長が補強効果の発現に好適であることが考えられる.

一方, モルタル密度 0.9 g/cm³ の場合 (F1, F2 については著しく施工性が悪かったため曲げ試験を実施しなかった) については, F3 を用いたモルタルは繊維の分散も改善され, 補強の効果が現れている. しかし, ここでも F3 に比べて繊維の分散の良い F4 を用いたモルタルは繊維のアスペクト比が小さいにもかかわらず高い補強効果を示した. 第 5 図に曲げ強度に及ぼす繊維の添加率の影響を示す. F3 は第 2 表に示すようにサイジングの程度が「middle」のものである. これをサイジングの程度を低くした「soft」を使用した実験を行った結果, 繊維添加率 1 vol% において, 繊維の分散性は第 5 表に示す評価で「」に相当し, 曲げ強度も 5.29 N/mm² と大幅に向上した. このことから, 曲げ強度に繊維の分散性は大きく影響し, また, 繊維の分散性にはサイジングの程度が大きく影響することが分かった.

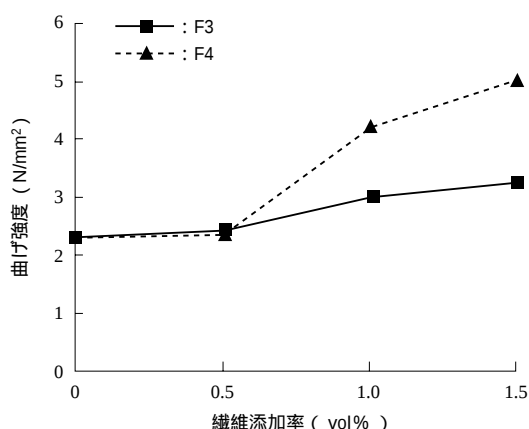
4. 建築部材への適用事例

モルタル密度 0.9 g/cm³ のビニロン繊維補強モルタルの適用事例として, 集合住宅 (第 6 図) 向けの外壁材 R コーナパネル (第 7 図) を紹介する.

適用に際し, R コーナパネルの各種性能確認のため以下に示す試験を実施した.

- (1) パネルの曲げ試験
- (2) パネルの取付箇所の強度試験
- (3) パネルの衝撃試験

本稿では上記試験のうち, 繊維を添加することによって発揮される耐衝撃性能について紹介する. パネルの運搬時



(注) モルタル密度 : 0.9 g/cm³

第 5 図 曲げ強度に及ぼす繊維の添加率の影響

Fig. 5 Effect of fiber content on bending strength of mortar (Density of mortar : 0.9 g/cm³)



第 6 図 Rコーナパネルが用いられる集合住宅（例）
Fig. 6 Apartment building using R-corner panel (example)



第 7 図 Rコーナパネル
Fig. 7 R-corner panel

および施工時のハンドリングの際、曲げ荷重と同様に衝撃荷重を受ける場合がある。使用前の製品に発生するひび割れは、一般にこの衝撃荷重による場合が多い。

4.1 実験方法

第 8 図に示す実験装置を用い、実物パネル中央部に振り子の要領で鋼球（2 kg）を落下（落下高さ 1 m）させ、衝撃を与えた。

4.2 評価方法

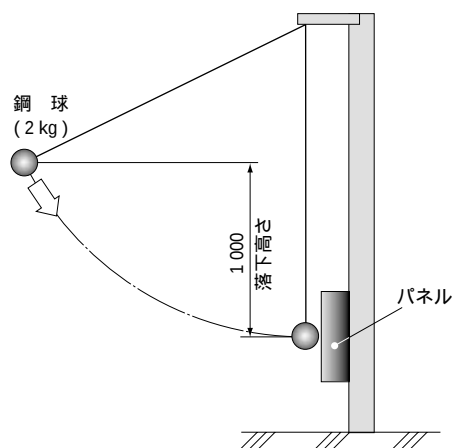
実験結果は、従来製品（繊維無添加モルタルを金網で補強するタイプのパネル）と比較し、評価した。評価は以下の 2 項目とした。

（1）ひび割れ発生までの衝撃回数

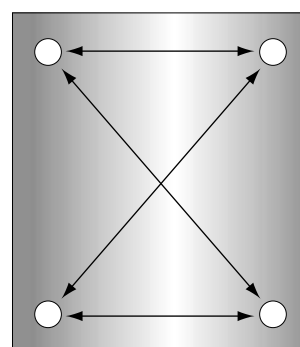
鋼球落下ごとにパネルの両面を目視観察し、ひび割れの有無を確認した。

（2）パネルの健全度

パネルの 4 隅を第 9 図に示す矢印で結んだ 2 点間



第 8 図 実験装置概念（単位：mm）
Fig. 8 Concept of apparatus for impact tests (unit : mm)



第 9 図 超音波伝搬速度計測位置
Fig. 9 Position measured of transmitted speed of ultrasound

（4 組）の超音波伝搬速度を計測し、それぞれのパネルについて、鋼球落下前後の伝搬速度の違いで健全度を評価した。評価式を（2）式に示す。

$$\text{健全度（\%）} = \frac{\text{鋼球落下後の伝搬速度の平均値}}{\text{試験開始前の伝搬速度の平均値}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

4.3 実験結果

（1）ひび割れ発生までの衝撃回数

第 6 表にひび割れ発生までの衝撃回数を示す。鋼球衝突面および裏面のどちらにおいても、ひび割れ発生までの衝撃回数はビニロン繊維補強タイプのパネルの方が、従来の金網補強タイプのパネルよりも多く、衝撃荷重に対するひび割れ抵抗性が高いことが確認された。

第 6 表 ひび割れ発生までの衝撃回数
Table 6 Number of impacts until crack development

パネルタイプ	鋼球衝突面（回）	裏面（回）
ビニロン繊維補強パネル	5	4
金網補強パネル	2	1

(2) パネルの健全度

衝撃回数と健全度の関係を第 10 図に示す。従来の金網補強タイプのパネルでは 1 回の衝撃で健全度が 70%程度にまで低下するのに対し、ピニロン繊維補強タイプでは、5 回目の衝撃まではほとんど健全度は低下せず、優れた耐衝撃性能をもっていることが確認された。

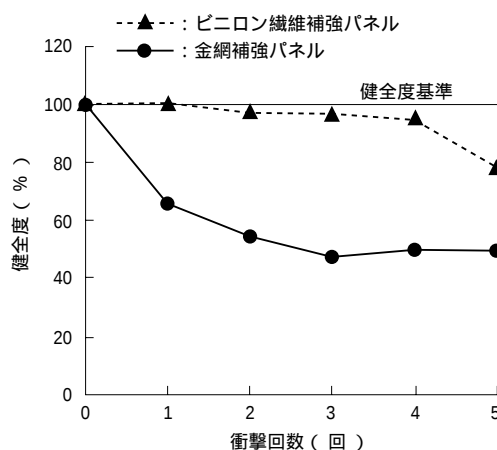
なお、耐衝撃性能以外のパネルの曲げ強度および取付箇所の強度についても、ピニロン繊維補強モルタル製品は従来製品と同等以上の強度であった。

5. 結 言

モルタル密度が $0.7 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$ の超軽量モルタルにおけるピニロン繊維補強効果を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 補強効果の発現においては、繊維の分散状態が重要であり、これにはサイジングの程度と繊維径が影響する。
- (2) 超軽量モルタルの弾性係数は、普通モルタルに比較して小さいので、繊維による補強効果が高い。

また、この超軽量モルタルの集合住宅向け外壁材への適用性について、特に、繊維を添加することで耐衝撃性能が大幅に向上することを紹介した。今後も、軽量であることが要求されるもの、または、軽量にすることでメリットが得るようなものなどへの適用を図っていく意向である。



第 10 図 衝撃回数と健全度の関係

Fig. 10 Relationship between number of impacts and soundness

参 考 文 献

- (1) たとえば、綾野克紀ほか：形状寸法の異なるピニロン繊維の混合効果に関する研究 コンクリート工学年次論文集 Vol.24 No.1 2002 年 7 月 pp.213 - 218
- (2) 伊達重之ほか：裏込め用軽量気泡モルタルの施工性と強度 土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部 Vol.55 2000 年 9 月
- (3) 真嶋光保ほか：繊維補強セメント/コンクリート複合材料 技報堂出版 1994 年 5 月 p. 28