

# 論文 複数ひび割れを生じるPVA短繊維補強軽量気泡モルタル

山本 基由<sup>\*1</sup>・本田 賀久<sup>\*2</sup>・武藤 功治<sup>\*3</sup>・六郷 恵哲<sup>\*4</sup>

**要旨:** プレフォーム法により作製した気泡を PVA 短繊維補強モルタルに混合比を変えて混入し、複数ひび割れを生じる繊維補強軽量気泡モルタルを作製し、強度や靱性などの諸物性やひび割れ性状について検討するとともに、曲げ試験後の破断面をデジタルマイクロスコープで観察した。その結果、気泡の混入により、初期ひび割れ荷重が下がり、最大荷重点までの変位およびひび割れ本数が増加することが明らかとなった。モルタルと気泡との混合比 1 : 1 (空気混入率 63.3vol%) を境に、それより気泡が少ない場合 PVA 繊維は概ね破断し、多い場合にはマトリックスが破壊する傾向が認められた。

**キーワード:** PVA, 短繊維, 気泡モルタル, 複数ひび割れ

## 1. はじめに

繊維を 2vol% 近く含有し、靱性が大きく、複数ひび割れが生じる繊維補強セメント複合材料<sup>1)</sup> (以下 ECC と略す) が近年開発され、その利用が広まりつつある。

一方、気泡を大量に含む気泡モルタルは地盤材料よりも軽く、強度は同程度以上あるため、地盤材料に代わる裏込材などとして利用されている。しかし、気泡モルタルは通常のコンクリートに比べれば脆弱であることから、適用範囲は限られている。

本研究では図-1 に示すように繊維補強モルタル (FRCC や ECC など) と気泡モルタル (気泡ミルクとも呼ばれる) の互いの特徴を生かし、また性能を補完し合う材料として「複数ひび割れを生じる繊維補強軽量気泡モルタル」を開発することを目標としている。気泡モルタルに繊維を入れることにより、フレッシュ状態での気泡モルタルの保形性が改善され (泡が壊れにくい)、硬化後の材料の脆性が改善される。また繊維補強モルタルに気泡を大量に入れることにより、軽くなり、施工性が改善され、低価格化できる。さらに、気泡を混入し繊維の分散状態を

均一に保ったままでマトリックスの強度を積極的に低下させることにより、複数ひび割れの発生を促進することができると考えた。

既往の研究では、軽量骨材や起泡剤を添加し繊維を加えることにより、セメント成型体の軽量化、高靱性を狙ったもの<sup>2)3)</sup>があるが、プレフォーム法で作った気泡を大量に繊維補強モルタルに混入した研究はほとんどない。

気泡モルタルはその気泡の作り方の違いで、次のように分類される。

1) プレフォーム法: 起泡剤を用いてあらかじめ気

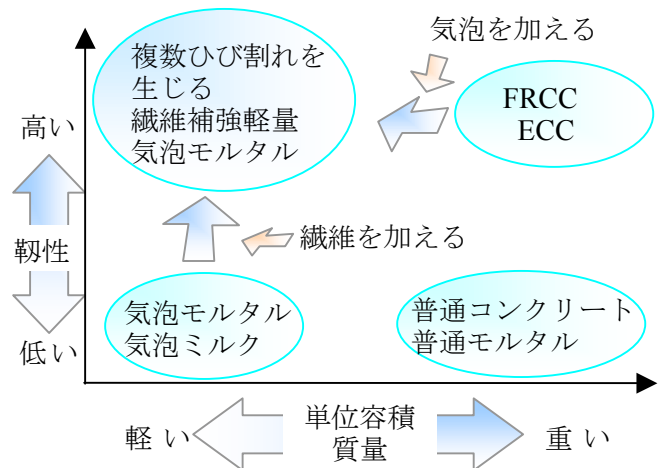


図-1 繊維補強軽量気泡モルタルの考え方

\*1 岐阜大学 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻 農修 (正会員)

\*2 小野田ケミコ (株) 名古屋支店

\*3 岐阜大学 工学部土木工学科

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

表－１ ベースモルタルの材料と配合

	水セメント比 W/C(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		水	セメント	細骨材	繊維	増粘剤	減水剤
		W	C	S	VF	V	SP
実験Ⅰ	27.1	324	1196	374	18.4	0.9	35.9
		水道水	早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm <sup>3</sup> )	7号珪砂(密度 2.6g/cm <sup>3</sup> )	PVA-40	メチルセルロース系 (C×0.071%)	ポリカルボン酸系 (C×3%)
実験Ⅱ	50.0	571	1141		18.4	1.5	
		水道水	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )		PVA-200	メチルセルロース系 (C×0.14%)	
実験Ⅲ	64.3	662	1029		9.5		
		水道水	高炉セメントB種 (密度 3.04g/cm <sup>3</sup> )		PVA-200		

泡を作っておき、モルタルに混入する方法。他と比較して、気泡の量や径を管理し易く、土木施工などで適用されている方法

2)ミックスフォーム法:モルタルなどの製造時に起泡剤を添加し、練り混ぜ中に気泡を作る方法

3)アフターフォーム法:モルタルなどの製造時にアルミ粉末などの発泡剤を添加し、練り混ぜ後、化学反応によってガスを発生させる方法

本研究では1)のプレフォーム法を採用した。

さらに、軽量で、ある程度靱性を有する材料としての利用を考え、単位容積質量 0.7g/cm<sup>3</sup>程度となる配合についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

試験体作製のためのベースモルタルに使用した材料およびその配合を表－1に示す。起泡剤はアルキルサルフェート系の市販のものを使用し、所定の濃度に希釈したものを25倍に発泡させて用いた。

### 2.2 使用繊維概要

使用したPVA繊維の物性値について公表されている値を表－2に示す。実験ⅠではPVA-40を実験ⅡおよびⅢではPVA-200を使用した。

### 2.3 試験体の製作

原則として曲げ試験用供試体(100×100×400mm)2個と、圧縮試験用供試体(φ50×100mm)2個を、それぞれの配合により作製した。

表－2 使用したPVA繊維

名称	PVA-40	PVA-200
繊維長 (mm)	12	18
繊維径 (mm)	40×10 <sup>-3</sup>	200×10 <sup>-3</sup>
引張強度 (MPa)	1600	975
伸度 (%)	6	8
弾性率 (GPa)	40	29
外観	マルチフィラメント	マルチフィラメント 集束タイプ

表－3 気泡モルタルの打設水準

	F/M (気泡/モルタル)					養生方法
	0	0.25	0.5	1	2	
実験Ⅰ	○	○	○	○	○	湿布 20℃
実験Ⅱ	○	○	○	○	—	湿布 20℃
実験Ⅲ	—	—	—	—	○ (1.9)	湿空 20℃

表－4 試験項目

試験項目	試験方法	備考
曲げ試験	JCI-SF4	100×100×400mm2個*
圧縮試験	JIS R5201	φ50×100mm 2個*
単位容積質量	JIS A1116	重量法
空気量	同上	同上
フロー試験	JIS R5201	

\*実験Ⅲでは、曲げ供試体は7個、圧縮供試体の寸法は100×100×180mmで2個実施

表－５ モルタルの配合と練り上がり直後の物性

実験	F/M	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							単位容積質量 (g/cm <sup>3</sup> )	フロー値 (mm)	空気混入率 (%)	強度試験材齢 (日)
			水分			セメント	細骨材	繊維					
			混練水	起泡剤	希釈水			質量	Vf				
I	0.00	27.1	324	0.00	0.00	1196	374	18.4	1.42	1.95	221	10.8	21
I	0.25	27.9	270	0.40	7.51	999	312	15.4	1.18	1.64	229	24.1	21
I	0.50	28.6	218	0.64	12.10	805	252	12.4	0.96	1.32	221	38.2	21
I	1.00	30.2	127	0.74	14.07	468	146	7.2	0.56	0.78	215	63.3	21
I	2.00	33.4	79	0.93	17.6	293	92	4.5	0.35	0.50	177	76.1	21
II	0.00	50.0	571	0.00	0.00	1141		18.4	1.42	1.73	249	5.2	22
II	0.25	50.9	444	0.37	7.00	889		14.4	1.11	1.36	237	25.5	22
II	0.50	51.8	378	0.63	11.91	756		12.2	0.94	1.16	213	36.0	22
II	1.00	53.5	267	0.89	16.84	535		8.6	0.67	0.83	180	53.8	22
III	1.90	71.7	227	0.26	25.92	353		3.3	0.25	0.62	—	63.1	29*

\* 圧縮強度試験については材齢 51 日で行った。

3 種類（実験 I ～ III）の異なるベースとなる繊維混入モルタルを作製した後、表－3 に記す所定の体積比（モルタルの体積を 1 とした気泡の体積（以下 F/M と略す）で気泡を混合する「プレフォーム法」で気泡モルタルを作製した。練り混ぜは、実験 I と実験 II では容量 20L のホバートミキサーを使用した。

繊維を混入する際、モルタルの密度が低下すると、収束した繊維の分散性が悪化することが報告されている<sup>4)</sup>。そこで、ベースモルタルの製作時において、実験 I では低 W/C かつ増粘剤を使用した。実験 II では、まず半分の水と増粘剤を使用してモルタルを練ったところに、繊維を加えて分散させた後、残る半分の水を投入した。実験 III では、気泡モルタルへの使用を考え、実機を用い、高 W/C かつ増粘剤を使用せずにセメントミルクを作製し、そこに繊維を投入した後、気泡を混合した。実際の施工に用いる場合、繊維の種類、配合、ミキサーの能力ごとに練り混ぜ方法を検討し、目視、洗い出し、硬化後の破断面などで繊維の分散状況を確認するなどの注意が不可欠である。

気泡モルタルは、表面積が大きく乾燥し易い

ことから、初期養生時、そのままでは気泡が壊れ表面が荒れるため、表面を仕上げの直後にラップで覆い、水分の蒸発や乾燥収縮を予防した。また、初期養生期間を 3 日間とし、4 日目以降に脱型して所定の養生を行った。

#### 2.4 顕微鏡観察

実験 I シリーズについて曲げ試験中の最大荷重付近における供試体側面（石膏を薄く塗布した）のひび割れおよび試験後の破断面をデジタルマイクロスコプで観察した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 フレッシュおよび材料試験結果

3 種類の実験で作製した合計 10 種類のモルタルについて行った試験項目を表－4 に、その配合と練り上がり直後の物性を表－5 に示す。また、プレフォーム法であることから、空気とともに若干水分を加えることになるため、F/M が大きくなるほど W/C も増加する。特に W/C の小さい配合ほど、その値の増加率も大きくなる傾向がある。フロー値については、気泡が多くなると若干低下する傾向がある。これは密度が小さくなることから、フローコーンに詰めた材料

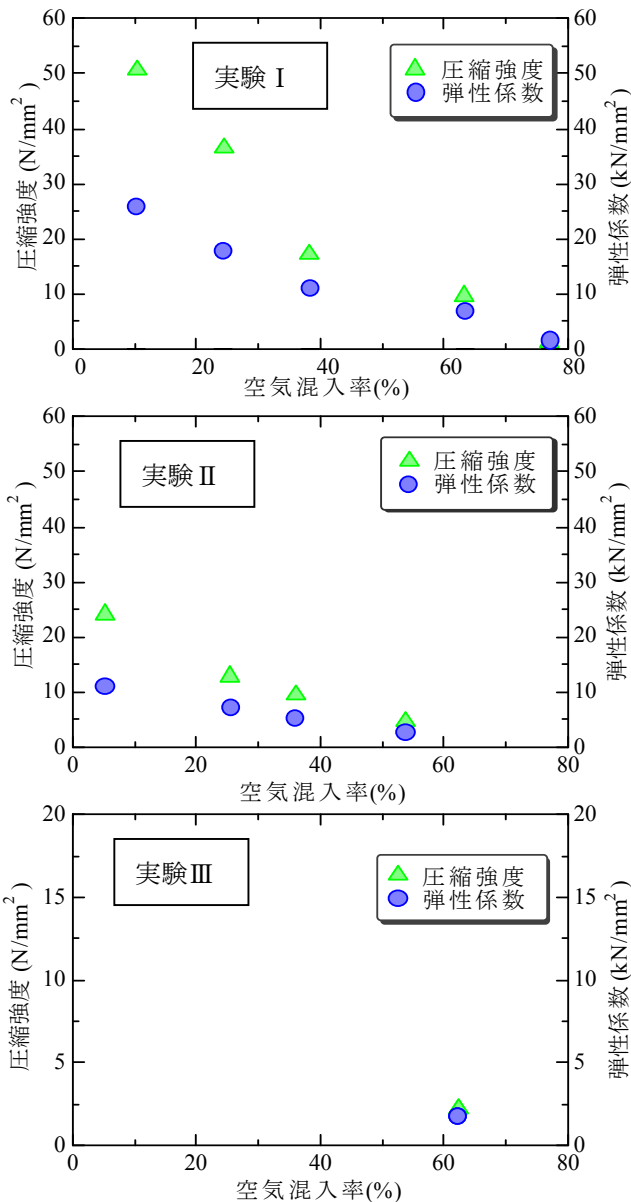


図-2 各実験における空気混入率と圧縮強度および弾性係数の関係

の自重が軽くなるためと考えられる。ほとんどの配合においてフロー値が 180 程度以上となり施工しやすい状況であった。

### 3.2 強度試験

#### 1) 圧縮強度

圧縮試験の結果と空気混入率との関係を図-2に示す。実験 I では、空気混入率が増えるに従って、圧縮強度と弾性係数が低下した。気泡の混入は同時に水分を添加することから W/C が若干増加するが、それより空気混入率の増加による影響が顕著に示された。ただし、繊維混入の圧縮強度に対する影響は認められない。実験 II においても、同様の傾向が観察された。実験

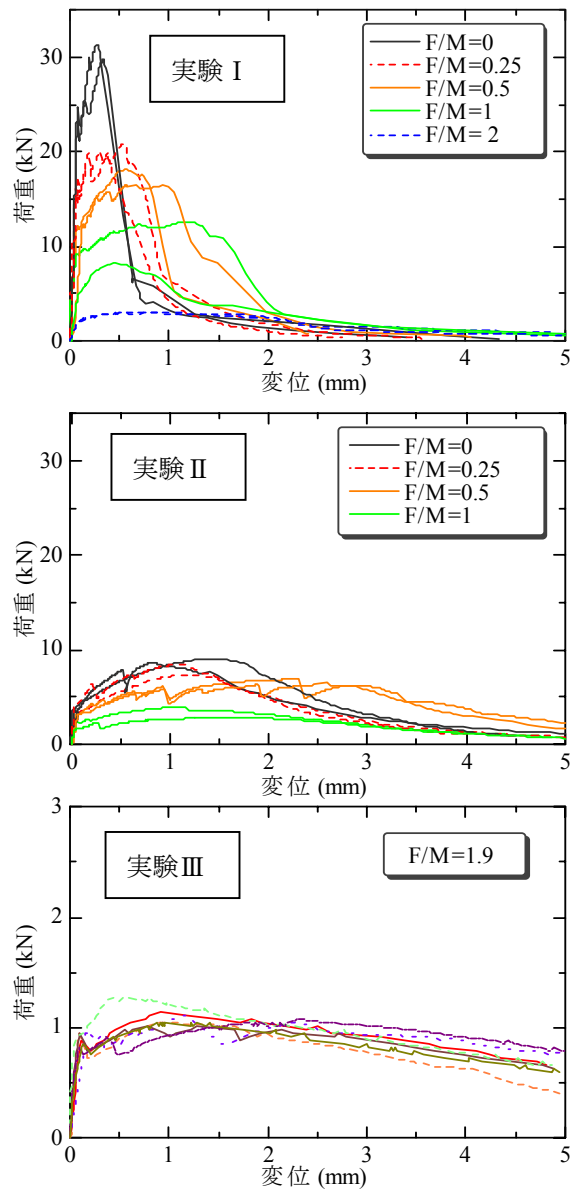
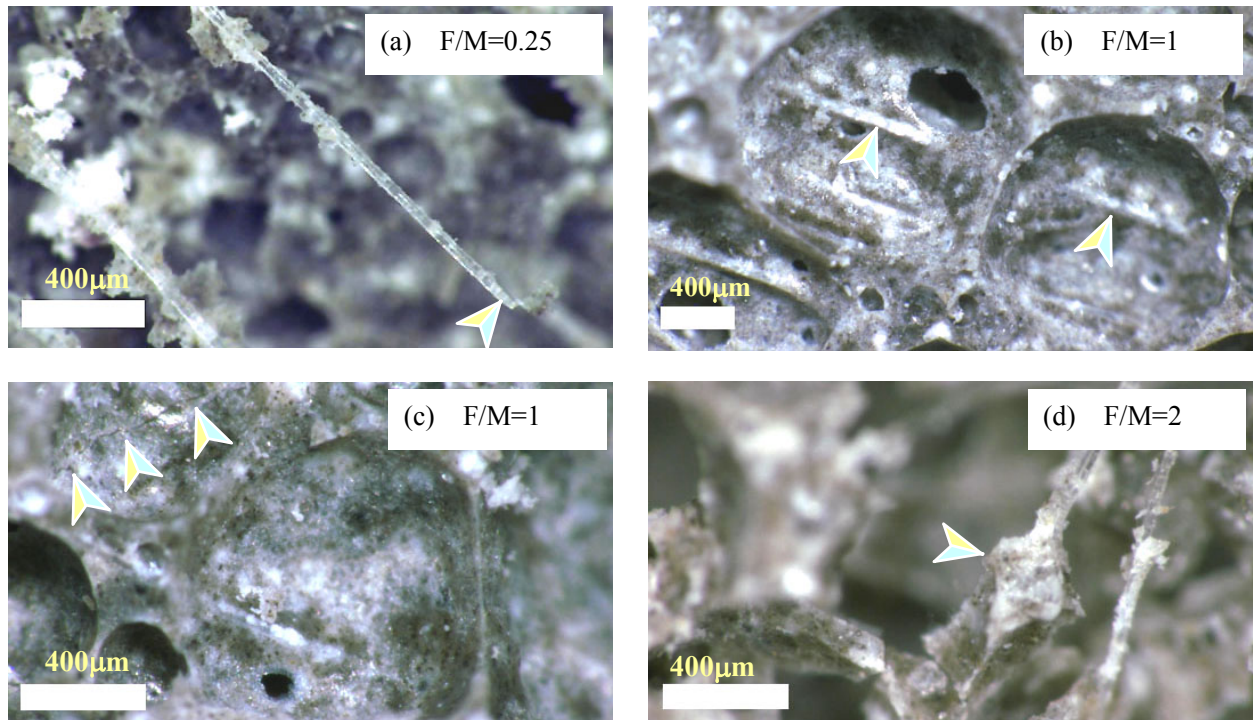


図-3 各実験および気泡混入率における荷重-変位曲線

IIIにおいては圧縮強度も弾性係数もさらに低い値となった。繊維補強モルタルの W/C を小さくすることにより、繊維補強軽量モルタルの強度と弾性係数を高めることができた。

#### 2) 曲げ強度

曲げ試験の結果と F/M との関係を図-3に示す。実験 I では、F/M=0 の時、高い初期ひび割れ荷重となった。変位の増加に伴って、荷重が増加し、ひび割れ本数が増加し、たわみ硬化型の挙動を示した。この F/M=0 をベースモルタルに使用して混入する気泡の割合を大きくすると、初期ひび割れ荷重が低下し、ひび割れ本数が増加し、初期ひび割れ荷重から最大荷重ま



図－４ 実験Ⅰの曲げ供試体破断面のデジタルマイクロスコープ画像

表－６ 実験Ⅰの曲げ供試体破断面の顕微鏡観察の結果

F/M	気泡の状態	繊維の様子
0	散在するエントレインドエアが観察された。気泡は少なかった。	繊維が破断していた。抜け出した繊維は短く、先端は損傷していた。
0.25	気泡はまばらで、大きさは混入前の泡の粒径とほぼ変わっていなかった。	繊維が破断していた。抜け出した繊維は短く、先端は損傷していた（図－４(a)矢印）。
0.5	隣り合う気泡との壁に小さな穴が開きつながっているものが観察された。	繊維が破断していた。
1	多くの気泡が結合しており、さらに径の大きな空洞が観察された。各気泡に穴が開き、隣接する気泡と繋がっていた。	気泡内に露出した繊維がセメントマトリックスに覆われていた（図－４(b)矢印）。マトリックスにマイクロクラックが観察された（図－４(c)矢印）。繊維の破断から、マトリックスの破壊に移行していた。
2	空隙が大きく、気泡とは分からなかった。気泡の間にあるマトリックスが繊維に絡む形で残っていた。	繊維が切れるより先に周辺のセメントマトリックスが壊れていた。（図－４(d)矢印）セメントマトリックスと繊維と間の付着は高く、破壊後も付着していた。

での変位が長くなる傾向にあった。

実験Ⅱでは W/C=50 のベースモルタルを使用したことから、初期ひび割れ荷重はそれほど高くはかったが、初期ひび割れ後はたわみ硬化挙動を示した。気泡を混入することにより、最大荷重までの変位が大きくなる傾向にあった。

実験Ⅲでは荷重は低い、ひび割れが複数本発生し、大きな変形能を示した。

### 3.3 デジタルマイクロスコープによる観察

観察した破断面のデジタルマイクロスコープ

画像の例を図－４に、観察結果を表－６に示す。

また、観察した曲げ供試体側面のひび割れの例を図－５に、ひび割れ観察結果を表－７に示す。

混入する前の気泡は粒径が 100～400μm 程度であったが、マトリックス中の気泡は F/M が 0.5 より大きくなると気泡同士が結合し、大きな粒径の気泡が観察された。特徴的なことは、気泡内を貫通している繊維がセメントマトリックスに覆われていたことである。これはフレッシュ状態での繊維とセメントペースト間の界面の高い

親和性によるものと考えられ、強度の向上に有効であると考えられる。曲げ供試体のひび割れ本数は、F/M の増加に伴い増加する傾向があった。また、平均ひび割れ幅はどの F/M の場合においても 0.10mm 以下であった。

#### 4. おわりに

- (1) 繊維補強モルタルにプレフォーム法で作製した気泡を大量に混入することにより、複数ひび割れ型の繊維補強軽量気泡モルタルを製造することができた。
- (2) 繊維補強軽量気泡モルタルの強度と弾性係数は、空気混入率の増加に伴って低下した。繊維補強モルタルの W/C を小さくすることにより、気泡混入後の繊維補強軽量気泡モルタルの強度と弾性係数を高めることができた。
- (3) 空気混入率の増加に伴って、曲げ試験時の初期ひび割れ荷重は低下するものの、ひび割れ本数が増加し、最大荷重までの変位区間が長くなる傾向にあった。空気混入率の小さいモルタルの場合は PVA 繊維が破断していたのに対し、F/M=1 (空気混入率 63.3%) を境に、それ以上の空気混入率のモルタルでは、セメントマトリックスが破壊されていることが顕微鏡で観察された。
- (4) 繊維が剥き出しのまま気泡を貫通しているものは観察されず、セメントマトリックスに包まれた状態にあった。このことから、繊維とマトリックス間の付着は気泡混入によって大きな影響を受けていないと考えられる。

この研究の成果は、気泡モルタルと繊維補強モルタルの双方の改善に役立つ。気泡モルタルは収縮により大きなひび割れが生じやすいが、繊維を入れて複数の小さなひび割れに分散させることができ、目地を設けない連続的な構造物や壁面への適用も可能となる。使用する繊維と気泡の割合や性質をうまく組み合わせることにより、強度、靱性、質量、施工性、コストなど

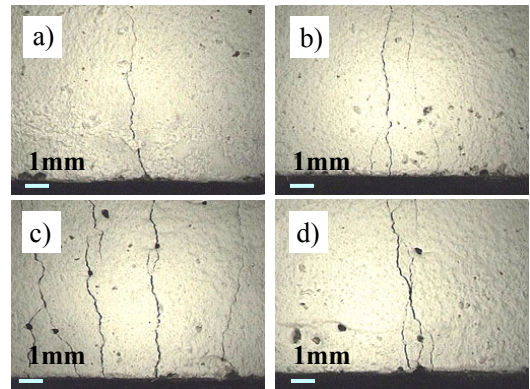
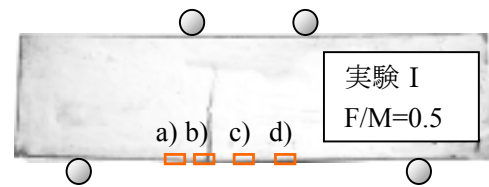


図-5 実験 I の曲げ供試体のひび割れ観察

表-7 実験 I のひび割れ観察結果

F/M	平均ひび割れ本数 (本)	平均ひび割れ幅 (mm)
0	3	0.07
0.25	4	0.08
0.5	8	0.06
1	10	0.10
2	15	0.06

が使用条件に最適なものを選ぶことができる。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会, 高靱性複合材料を知る・作る・使う, pp.3-6, 19-21
- 2) 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, 2004
- 3) 高橋仁智, 橋高義典, 田村雅紀, 吉岡昌洋: 超軽量繊維補強コンクリートパネルの曲げひび割れに及ぼす繊維補強の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, 2000
- 4) 柿沢忠弘, 大野定俊, 阪西康, 米沢敏雄: 集束型ビニロン短繊維の軽量コンクリート中での分散状態がコンクリートの材料特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, 1997