

[106] アラミド繊維補強セメント複合材 (AFRC) の力学的特性

正会員 秋浜 繁幸 (鹿島建設技術研究所)  
 正会員 末永 龍夫 (鹿島建設技術研究所)  
 山口 雅宏 (帝人繊維加工研究所)  
 正会員○中川 裕章 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

芳香族ポリアミド繊維 (アラミド繊維) は、引張強度・弾性率などの力学的性質に優れ、さらに、耐熱性や耐薬品性など化学的にも安定な高分子繊維である。最近になり、同繊維をセメント系マトリックスの補強用繊維として使用する研究<sup>1)</sup>が、かなり積極的に行われるようになり、アラミド繊維補強セメント複合材 (AFRC) を各種建築部位に適用する検討がなされている。著者らも、アラミド短繊維で補強した AFRC について実験的研究を行い、この結果、AFRC の最適オートクレーブ養生温度は 140℃ で、このオートクレーブ養生により、乾燥収縮率が著しく低減されること、長期暴露による強度低下はほとんど生じないこと<sup>2)</sup>、などが確認された。そして、今回の実験では、AFRC の繊維混入による強度特性の向上を目的として、繊維補強効果に影響を及ぼす以下の要因について繊維混入率を変えて曲げ試験及び純引張試験を行った。

- a. マトリックスの種類
- b. 繊維の表面処理の有無
- c. 鉄筋による補強効果
- d. 供試体の寸法効果

2. 実験概要

2-1 使用材料と調合

実験に使用したアラミド繊維 (繊維長さ  $l_f = 6$  mm) の性質を表-1 に示す。今回の実験では、繊維の分散性を考慮して、同繊維の表面に変性ナイロン樹脂処理を施したストランド状繊維も一部使用した。マトリックスは、繊維の分散性及び付着性に大きく関与するため、比重の異なる2種類の調合について実験を行った。マトリックスの調合を表-2 に示す。骨材は粉末珪石及びマイクロバルーンを、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

表-1 アラミド繊維の性質

繊維径 (μm)	比重	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸度 (%)
12.4	1.39	310	7,700	4.2

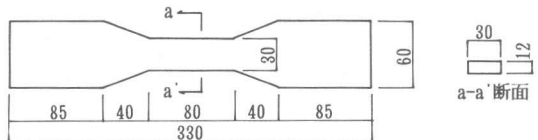


図-1 純引張供試体の形状・寸法 (単位: mm)

表-2 マトリックスの調合

調合 No.	水セメント比 W/C (%)	骨材セメント比 S/C	重量調合 (kg/m <sup>3</sup> )						気乾比重
			早強セメント	水	マイクロバルーン	粉末珪石	混和剤		
1	73.7	0.43	716	528	99	207	4.4	3.2	1.4
2	47.3	0.25	993	470	-	252	3.0	3.2	1.8

表-3 供試体の種類

供試体 No.	寸法 (bxdxlcmm) (スパン(cm))	マトリックス		繊維混入率 Vf (%)				表面処理		補強鉄筋 (oy=28.5kgf/cm <sup>2</sup> )		備考	
		No.1 調合	No.2 調合	0.75	1.0	1.5	2.0	無	有	無	2.6mmφx2 Pt=0.24% 3.2mmφx2 Pt=0.36%		
1	3x1.2 (a-a'断面)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	純引張試験*
2	4x4x16 (10)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	中央集中載荷曲げ試験
3	5x10x100 (90)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	3等分点載荷曲げ試験
4	5x10x200 (180)	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	○	〃

\*図-1参照

## 2-2 練りませ及び養生方法

練りませはオムニミキサーを用いて行った。供試体は、型枠成形後材令24時間で脱型し、一旦20℃・65%RH条件室に静置したのち、材令48時間で140℃×4時間のオートクレーブ養生を行い、以後20℃・65%RH条件室に静置した。なお、強度試験は、材令1週で行った。

## 2-3 供試体の種類と試験方法

今回使用した供試体の種類を表-3に示す。また、純引張供試体の形状を図-1に示す。今回の実験では、梁型部材の一部に配筋(2.6mmφx2及び3.2mmφx2, 引張縁より10mm)を施した供試体を作成し、曲げ試験を行った。

a. 純引張試験: 10tonインストロン試験機を使用し、クロスヘッドスピード0.5mm/minの変位制御方式で載荷した。また、供試体中央部の両面に測長60mmのワイヤーストレンゲージを貼付し、荷重~ひずみ曲線をX-Yレコーダーに記録した。

b. 曲げ試験: 2ton及び100tonオートグラフ試験機を使用し、クロスヘッドスピード2mm/min(供試体No.2)及び0.5mm/min(供試体No.3, 4)の変位制御方式で載荷し、荷重~たわみ曲線を同機のX-Yレコーダーに記録した。

## 3. 実験結果

### 3-1 小型供試体による短繊維補強AFRCの引張・曲げ特性

#### (1) まだ固まらないAFRCの性質

調合No.1の軽量マトリックスを使用し未処理繊維を混入したAFRCは、練りませ時にVf=1.5%以上で直径1~2mm程度のファイバボールが発生した。これに対して、表面処理繊維を混入したAFRCにはファイバボールの発生はなかったものの、ストランド状のままマトリックス中に混在する繊維がみられた。練りませ直後のAFRCのフロー値と繊維混入率の関係を図-2に示す。フロー値は、繊維混入率の増加とともに漸次低下した。また、調合No.1マトリックスで未処理繊維をVf=1.5%以上混入した場合は、フローの低下率は外の場合に比べてわずかに小さく、表面処理繊維を使用した場合は、フロー値は全体的に高い値を示した。この傾向は、上述のファイバボール及びストランド状繊維の混在により、マトリックス中に均等に分散している繊維の量が少なくなったためと思われる。

#### (2) 繊維混入率と引張・曲げ特性

繊維混入率の異なるAFRCの引張応力度~ひずみ度曲線(代表例)を図-3に示す。両調合同も低い繊維混入率の段階から2直線(bi-linear)形状を示し、繊維がAFRCの引張特性に有効に作用したと考えられる。

次に、AFRCの引張強度と繊維混入率の関係を図-4に示す。同図によると、引張強度は繊維混入率の増加に伴い漸次増大しているが、Vf=1.0~2.0%にかけてその増大率は低くなっている。また、より緻密な調合No.2マトリックスの

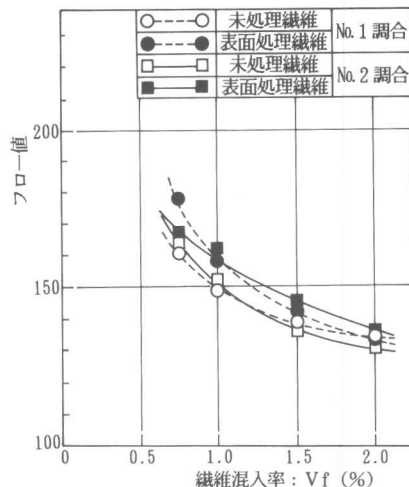


図-2 フロー値と繊維混入率の関係

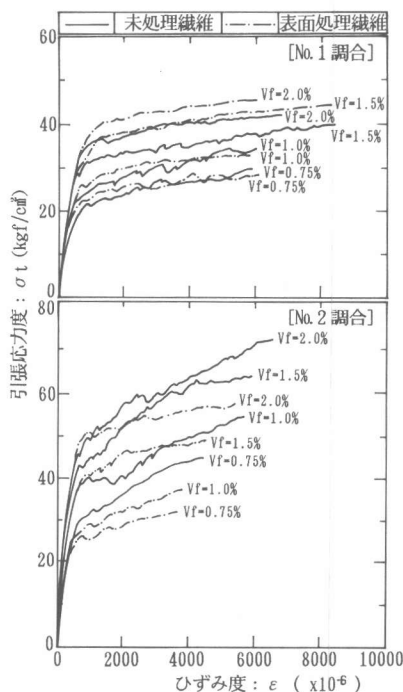


図-3 引張応力度~ひずみ度曲線(代表例)

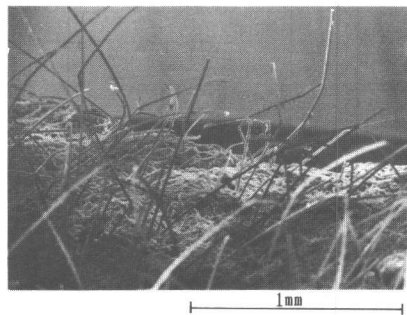


写真-1 破断面顕微鏡写真

ほうが引張強度が高い。

短繊維で補強した繊維補強セメント複合材の引張強度推定式のうちで、繊維混入率が限界繊維混入率以上の場合を対象とした式に、下記の(1)式がある<sup>3)</sup>。

$$\sigma_{tmax} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \sigma_{fu} \cdot Vf \quad \dots (1)$$

ここで、 $\sigma_{tmax}$ ：複合材の引張強度

$\sigma_{fu}$ ：繊維の引張強度または引抜け時の付着強度

$\eta_1$ ：繊維配向係数

$\eta_2$ ：繊維の有効長さ係数

今回の実験結果のうち、 $Vf = 1.5 \sim 2.0\%$ における引張強度増大率の低下傾向は、ファイバーボール及びストランド状繊維の発生により繊維の分散が悪化し、(1)式中の $\eta_1$ の値が低下したため、あるいは、実質の繊維混入量(1)式中 $Vf$ )が減少したためと考えられる。また、調合No.2マトリックスを使用したAFRCの引張強度が高いのは、繊維とマトリックスの付着が調合No.1マトリックスの場合よりもより強力で、 $\eta_2$ の値が高くなったためと考えられる。しかし、試験後の供試体の破断面(写真-1)を観察すると、繊維の抜け出し長さが約1~3mmと長く、かなりの繊維がマトリックスから引き抜けていることが判断でき、アラミド繊維とセメント系マトリックスとの付着力が不十分であることを示している。

AFRCの曲げ強度と繊維混入率の関係を図-5に示す。同図は、前記のまだ固らないAFRCの性質及びAFRCの引張特性と同様な傾向をより顕著に表している。即ち、 $Vf = 1.0 \sim 2.0\%$ にかけて曲げ強度の増大率が低下し、さらに、調合No.1マトリックスで未処理繊維を使用した場合は、 $Vf = 2.0\%$ で曲げ強度が低下しているのは、繊維混入率の増加により繊維の分散性が低下したためであり、調合No.2マトリックスを使用したAFRCの曲げ強度が高い値を示すのは、マトリックスと繊維の付着力が高いためと考えられる。

### 3-2 梁型部材による短繊維補強AFRCの曲げ特性

前項では、小型供試体によるAFRCの強度特性について検討してきたが、一般に、供試体の寸法が大きくなると強度が低下すること(寸法効果)が知られており、新材料を建築部位に適用する場合、大型の供試体による強度特性の把握が必要である。ここでは、スパン $l = 90\text{cm}$ 及び $180\text{cm}$ の梁型部材の曲げ特性について検討を行った。

#### (1) 無筋梁による曲げ特性

AFRC無筋梁の曲げ強度と繊維混入率の関係について、スパンの相違・マトリックスの種類・繊維の表面処理の有無を同時に比較して、図-6に示す。同図より、強度に影響を及ぼす要因に拘らず、いずれも繊維混入率の増加に伴い曲げ強度は増大しており、大型の部材に対しても小型供試体と同様に繊維補強の効果があることがわかった。また、調合No.2マトリックスで表面処理繊維を使用したAFRCの曲げ強度は、未処理繊維を使用したAFRCと比較して、かなり高い

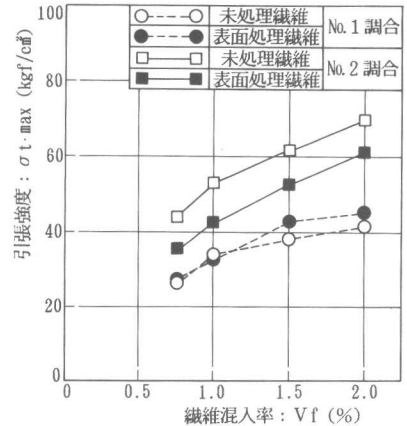


図-4 引張強度と繊維混入率の関係

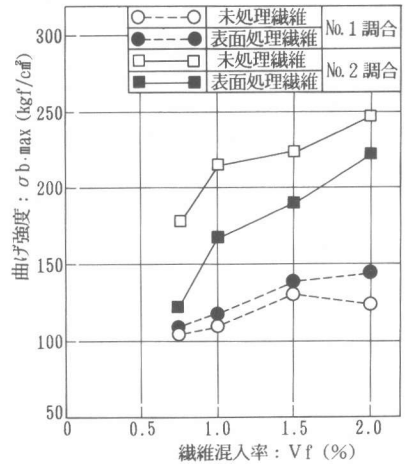


図-5 小型供試体の曲げ強度と繊維混入率の関係

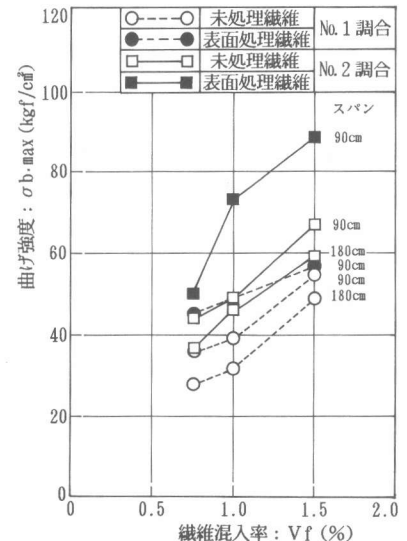


図-6 曲げ強度(無筋梁)と繊維混入率の関係

値になった。今回の供試体の破断面を観察すると、小型供試体にみられたストランド状繊維はなく、繊維を表面処理することにより、繊維の分散が良好に行われたことがわかった。

さらに、供試体の寸法効果については、いずれの繊維混入率においても、小型供試体（スパン $l=10\text{cm}$ ）の曲げ強度と比較して約30~40%（ほぼ小型供試体の引張強度に相当）に曲げ強度が低下した。

#### 2) 鉄筋補強したAFRC梁の曲げ特性

スパン $l=180\text{cm}$ のAFRC梁に鉄筋補強を施した供試体の曲げ応力度~たわみ曲線の代表例を図-7に、鉄筋比（ $Pt$ ）を変えた場合の曲げ強度と繊維混入率の関係を図-8に示す。これらの図から、 $Pt=0.24\%$ というわずかな鉄筋を配することにより、AFRCの曲げ特性は向上し、さらに鉄筋量の増加とともにその曲げ強度は増大する。つまり、マトリックスに短繊維を補強し、さらに少量の鉄筋を併用することにより、梁部材の曲げ特性は累加的に向上することが証明された。

#### 4. まとめ

長さ6mmのアラミド短繊維を、4水準の繊維混入率で混入したAFRCについて、純引張試験及び曲げ試験を行った結果、以下の事項が明らかとなった。

- AFRCの引張特性及び曲げ特性は、繊維を少量混入することにより向上し、繊維混入率の増加とともにその強度は増大する。
- AFRCの繊維補強効果は、より緻密なマトリックスを使用した場合に顕著に現われる。これは、主に、繊維とマトリックスの付着力の増大によるものと考えられる。
- 繊維混入率が増加すると、繊維の分散性が低下し、強度の増大率は徐々に低下する。しかし、その程度はマトリックスの種類により異なり、また、繊維に表面処理を施すことにより改善することができる。
- 大型梁部材（スパン $l=180\text{cm}$ ）を使用したAFRCの曲げ強度は、小型供試体（スパン $l=10\text{cm}$ ）の曲げ強度に比べ約30~40%（ほぼ小型供試体の引張強度に相当）に低下する。
- マトリックスに短繊維を補強し、さらに少量の鉄筋を併用することにより、梁部材の曲げ特性は累加的に向上する。

以上より、アラミド繊維は、セメント系マトリックスの補強用繊維として優れた性質を有していることが確認された。今後は、マトリックスの改良・繊維の表面処理などにより、繊維の分散性及び繊維とマトリックスとの付着性をさらに高め、AFRCの力学的特性の向上を図っていくつもりである。

なお、本研究は、鹿島建設（株）と帝人（株）との共同研究によって行われたものである。

#### 参考文献

- Walton, P.L. and Majumdar, A.J.: Properties of cement composites reinforced with Kevlar fibres. Building Research Establishment, CP 57/78. July 1978
- 秋浜, 末永, 中川, 鈴木, 山口; アラミド繊維補強コンクリート (AFRC) の実験的研究, セメント技術年報 39, 1985, pp.474 ~ 477
- Hannant, D.J.: Fibre cement and fibre concretes. John Wiley and Sons, 1978

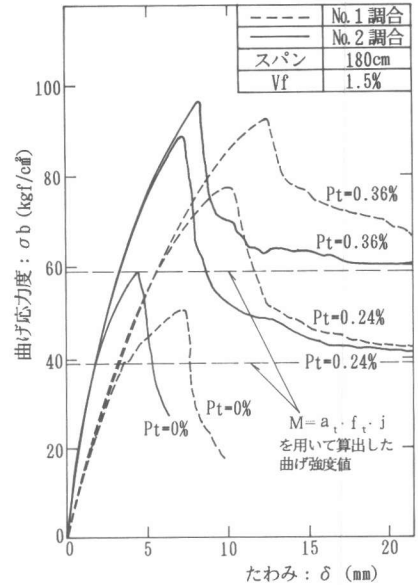


図-7 曲げ応力度~たわみ曲線

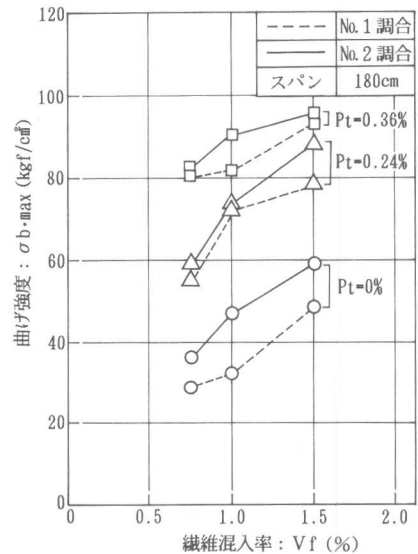


図-8 曲げ強度(補強筋梁と)繊維混入率の関係