

## 論文 短繊維補強モルタルの曲げ挙動と圧縮挙動に関する基礎的研究

中村裕<sup>\*1</sup>・三橋博三<sup>\*2</sup>

**要旨**：モルタルやコンクリートの引張強度や曲げ強度並びに脆性的な破壊挙動を改善する目的として、繊維を混入した実験的検討が数多くなされている。しかし、繊維とマトリックスの組み合わせに関する網羅的な検討や繊維の混入が圧縮の挙動に与える影響を検討したものは少ない。本研究では、種々の短繊維と水結合材比を変えたモルタルとを組み合わせ、曲げに対する挙動と同時に圧縮に対する挙動の検討を行った。その結果、繊維の種類によって曲げに対して優れた靱性を示すが、圧縮の靱性に対しては寄与しないもの、また曲げと圧縮の双方に優れた靱性を与えるものがあるということが明らかとなった。

**キーワード**：繊維補強モルタル, 短繊維, 曲げ挙動, 圧縮挙動, 水結合材比, 靱性

## 1. はじめに

水、セメント及び骨材で構成されるセメント系複合材料は、最大耐力に達すると急激にひび割れが進展し破壊に至る。そして、そのような破壊挙動の改善、並びに引張強度や曲げ強度の改善に対して繊維を混入することが有効であることは周知のことであろう。

繊維補強されたセメント系複合材料の最大耐力を上げるには繊維とマトリックスの強固な付着特性かつ引張強度の高い繊維の使用が必要である。一方、ひび割れに対する抵抗力をできる限り長く維持できるような優れた変形性能を実現するためには、繊維が破断せずに引き抜けるという挙動が必要である。しかし、繊維とマトリックスの付着特性は、繊維やマトリックスの物理的特性の影響を大きく受ける。ところが、繊維とマトリックスの適切な組み合わせがなされれば、短繊維を用いた場合でも、複数ひび割れを伴った変形性能に非常に優れたセメント系複合材料の作製が可能であると報告されている<sup>1),2)</sup>。また、Li<sup>3)</sup>は、マイクロメカニクスと破壊力学パラメータを駆使し、そして繊維とセメントマトリックスの界面特性を評価するパラメータ

を実験的に得、短繊維補強セメント系複合材料の疑似歪み硬化や複数ひび割れの発生条件式を提示した。しかし、繊維が引き抜けるということが前提とされておりどのような繊維やマトリックスに対してもその理論が適用できるかは疑問である。従って、現実的には繊維とマトリックスのどのような組み合わせが要求される性能を引き出すのに適切であるか、またどのような因子が破壊挙動に影響を及ぼすのかを実験的に検討することが必要である。また、繊維補強セメント系複合材料の引張や曲げに対する強度や変形性能が大きく注目される一方、圧縮挙動に関する検討はあまりなされていない。

以上のような背景を踏まえて、本研究では素材、寸法、強度等が異なる種々の短繊維と水結合材比を変えた3種類のモルタルとを組み合わせ、供試体を作製し、繊維の種類及びモルタルの特性の違いが、曲げ挙動や圧縮挙動に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 実験の概要

## 2.1 使用材料

使用した材料は以下の通りである。早強ポル

\*1 (株)前田先端技術研究所 研究第一部 研究員 工博(正会員)

\*2 東北大学大学院教授 工学研究科 工博(正会員)

表-1 使用した繊維の物理的特性

繊維の種類	記号	比重	直径 ( $\mu\text{m}$ )	長さ (mm)	長さ/直径	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
炭素繊維(PITCH系)	PIT	1.90	17	18	1059	1900	190
炭素繊維(PAN系)	PAN	1.80	7	6	857	4410	235
アラミド(Technora)	ARA6	1.39	12	6	500	3400	72.5
	ARA12	1.39	12	12	1000	3400	72.5
スチール	STE	7.85	100	6	60	980	240
ポリエチレン(A type <sup>*1</sup> )	PE・A	0.98	38	12.7	334	2700	120
(B type)	PE・B	0.97	12	12	1000	2940	98
(C type)	PE・C	0.97	12	15	1250	2940	98
(D type <sup>*2</sup> )	PE・D	0.97	12	15	1250	2490	76
ポリプロピレン	PP	0.91	40	12	300	482	2.61
ポリアリレート(Vectran)	PA	1.41	16	6	375	3234	75
PVA	PVA	1.30	37	12	324	1960	47

\*1:プラズマ処理, \*2: コロナ処理

トランドセメント (比重:3.14) , シリカフューム (比重:2.20) , 7号珪砂(表乾比重:2.61) , 増粘剤 (比重:1.3, 水溶性メチルセルロースエーテル) , 高性能減水剤 (比重:1.05, 主成分:ポリカルボン酸エーテル系の複合物) , 及び繊維 (表-1参照) である。

## 2.2 供試体の作製

### (1)調合

水結合材比 (以下, W/Bと記述する) は, 50, 60及び70wt.%を用意した。ただし, B, C, Dタイプのポリエチレン繊維, ポリプロピレン繊維, ポリアリレート繊維及びPVA繊維においてはW/B=60%のみを作製した。また, 水結合材比50%に対しては減水剤を結合材の2wt.%, 60及び70%に対しては減水剤を結合材の0.75wt.%を混入した。また, 砂結合材比を重量比で1.0, セメント重量に対するシリカフューム置換率を20%, 増粘剤水比を0.6wt.%, そして繊維混入率を, 3vol.%とした。

### (2)練り混ぜ

練り混ぜは容量5リットルのオムニミキサーを用いた。水, シリカフューム及び増粘剤をミキサーに投入し30秒間空練りを行い, そして水と

減水剤を投入し2分間練り混ぜた。その後砂を入れ1分間, さらに繊維を入れて2分間練り混ぜた。そして30秒間程度かきおとしを行い, 最後に1分間練り混ぜた後, 打設した。

### (3)養生

打ち込んだ翌日に脱型し, 7日材齢まで標準養生とした。

### (4)成形

各シリーズにおいて, 40x40x160mmの角柱供試体を3本,  $\phi$ 50x100mmの円柱供試体を3本作製した。尚, 締め固めは突き棒と木槌を用いて行った。

## 2.3 試験項目及び方法

### (1)切り欠き梁の曲げ試験

角柱供試体の中央部に深さ10mmの切り欠きをコンクリートカッターで載荷試験前日に設けた。そして, スパンを150mm, クロスヘッドの載荷速度を0.2mm/minとして中央集中載荷を行い, 荷重と載荷点の変位を測定した。

### (2)圧縮試験

コンプレッソメータを円柱供試体に取り付け, 圧縮応力とひずみを測定した。尚, クロスヘッドの載荷速度は0.2mm/minとした。

### 3. 実験結果及び考察

各シリーズの切り欠き梁の曲げ試験から得られた荷重-載荷点変位曲線を図-1に、また、圧縮試験から得られた圧縮応力-ひずみ曲線を図-2に示す。ただし、各シリーズの曲線は3本の平均の曲線として表記している。また、図中の"PL"はプレーンを意味する。

#### 3.1 曲げ挙動に関して

PITCH系炭素繊維： ピーク荷重は、 $W/B=60\%$ の時に最大となった。また、ピーク以降の荷重の低下勾配は水結合材比が高くなるに従い小さくなった。

PAN系炭素繊維： PITCH系炭素繊維と同様にピーク荷重は、 $W/B=60\%$ の時に最大となった。また、PITCH系炭素繊維と比較すれば、PAN系炭素繊維の方がピーク以降のひび割れ抵抗は大きい。

アラミド繊維： 繊維長さ6mmと12mmとを比較すれば、明らかに12mmの方が高いピーク荷重を示し、かつピーク以降のひび割れ抵抗性能も優れている。また、ピーク荷重は水結合材比が低くなるに従い増大する傾向を示したが、それほど大きな違いは認められなかった。また、アラミド繊維の場合は、繊維の分散が不十分であったために他の繊維に比べて同一調合の3本の供試体の挙動のばらつきが非常に大きく表れた。

スチール繊維： 水結合材比に拘わらず、ピーク付近では先鋭的な挙動を示し、またピーク荷重は、水結合材比が低いほど高い値を示した。

ポリエチレン繊維： Aタイプの繊維は、非常に塑性に富む挙動を示した。特に水結合材比が低いもの程、高いピーク荷重と優れたひび割れ抵抗性能を示した。また、供試体側面のノッチ先端付近には水結合材比に拘わらず細かいひび割れが多数発生した。同様にB、C、Dタイプも塑性的な挙動を示し、細かいひび割れが供試体側面に多数発生した。ただし、B、C及びDタイプでの細かいひび割れが発生した領域はAタイプのものよりも小さかった。PE・BとPE・Cの比較か

ら、繊維長さが長い方が優れたひび割れ抵抗性能を得るためには効果的であることが分かった。また、PE・CとPE・Dとの比較から、明らかに繊維に表面処理を施し繊維とマトリックスとの付着を高めた方が、高いピーク荷重と優れたひび割れ抵抗性能を得るには有効であることが分かった。

ポリプロピレン繊維： ひび割れが生じると同時に荷重の低下を示したが、直ぐに繊維の架橋により荷重は増大した。ピーク荷重は比較的低い値をとったが、ピーク以降は、非常になだらかな曲線を描いた。

ポリアリレート繊維： ピーク荷重は比較的高い値を示したが、ピーク以降は安定した挙動を示した。この挙動は、 $W/B=60\%$ における繊維長さ6mmのアラミド繊維が示した挙動とよく類似している。これは繊維の物理的特性が類似していることがその要因の一つと考えられる。

PVA繊維： その挙動はポリエチレン繊維と同様にピーク付近で塑性的な挙動を示し、また、供試体側面のノッチ先端付近に複数の細かなひび割れが生じた。しかし、載荷点変位が1mmを越えるとポリエチレン繊維よりも大きな勾配で荷重が低下した。

以上から各シリーズにおける曲げ挙動とひび割れ形状との関係はおおよそ以下のようにまとめられる。ピーク以降の荷重の低下勾配が大きいPITCH系炭素繊維、PAN系炭素繊維及びスチール繊維はいずれも1本かつ直線的なひび割れが生じた。特に両炭素繊維は破断し、スチール繊維は引き抜けている状態であった。ただし、ポリプロピレン繊維も1本かつ直線的なひび割れが生じたもののピーク以降の低下勾配は小さい。一方、ピーク付近で塑性的な挙動を示したポリエチレン繊維やPVA繊維はノッチ先端付近で多数のひび割れが発生し、アラミド繊維やポリアリレート繊維は、1、2本のひび割れが発生したが、ノッチ先端から大きく逸れ紆余曲折した形状を示した。各シリーズにおけるひび割れ形状の模式図を図-3に示す。

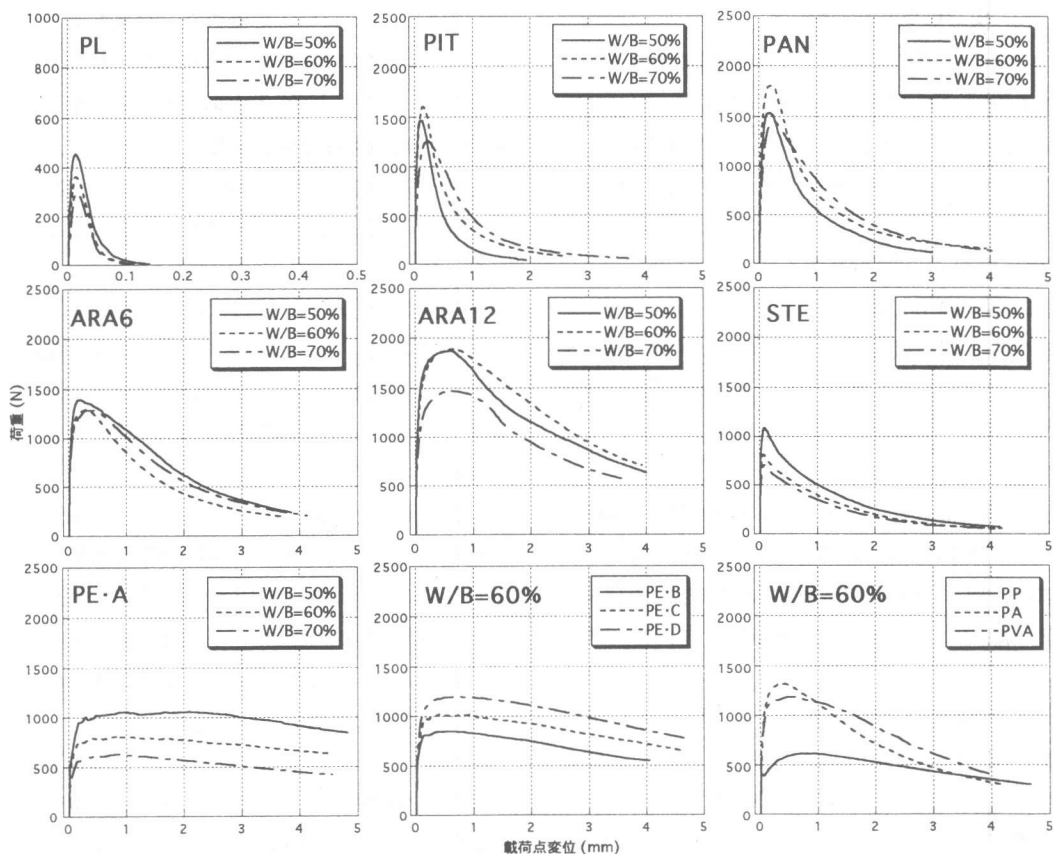


図-1 各シリーズの切り欠き梁の曲げ試験における荷重-載荷点変位曲線

### 3.2 圧縮挙動に関して

**PITCH系炭素繊維：** W/B=50%でピーク以降に不安定な破壊を示したが、W/B=60%及び70%では、比較的安定した破壊挙動を示した。しかしながら圧縮強度は、プレーンと比較して25～39%程低下した。また、切り欠き梁の曲げ試験では、W/B=60%でピーク荷重が最大になる傾向が見られたが、圧縮強度に関しては、水結合材比によって決まる傾向がある。

**PAN系炭素繊維：** W/B=50%の場合にピーク以降に不安定な挙動を示したものがあったが、それ以外の水結合材比では非常に安定した挙動を示した。圧縮強度は、プレーンと比較して21～24%の低下が見られた。

**アラミド繊維：** W/B=50%の場合に亀裂進展による不安定な挙動を示したものの、水結合材比に拘わらず、また繊維長さ6mm及び12mmの場

合でも、非常に韌性に優れた挙動を示した。さらに圧縮強度はW/B=50%の時にどちらの繊維長さもプレーンに対して20数%の増大が見られた。W/B=60%及びW/B=70%の場合でもプレーンと同等の圧縮強度を示した。また、繊維長さが圧縮挙動に与える影響は、曲げ挙動に与える影響よりも極めて小さいことが認められた。

**スチール繊維：** 水結合材比に拘わらず、ピーク直後に不安定な破壊挙動を示した。圧縮強度はW/B=50%で数%の増加が見られたが、それ以外の水結合材比では若干の低下が見られた。

**ポリエチレン繊維：** ピーク直後に不安定な挙動を示すものが多くあった。圧縮強度はプレーンに対して20～39%の低下割合を示した。また、繊維種類、繊維長さ及び表面処理の有無が圧縮挙動に与える影響は小さい。

**ポリプロピレン繊維：** ピーク直後に急激な荷

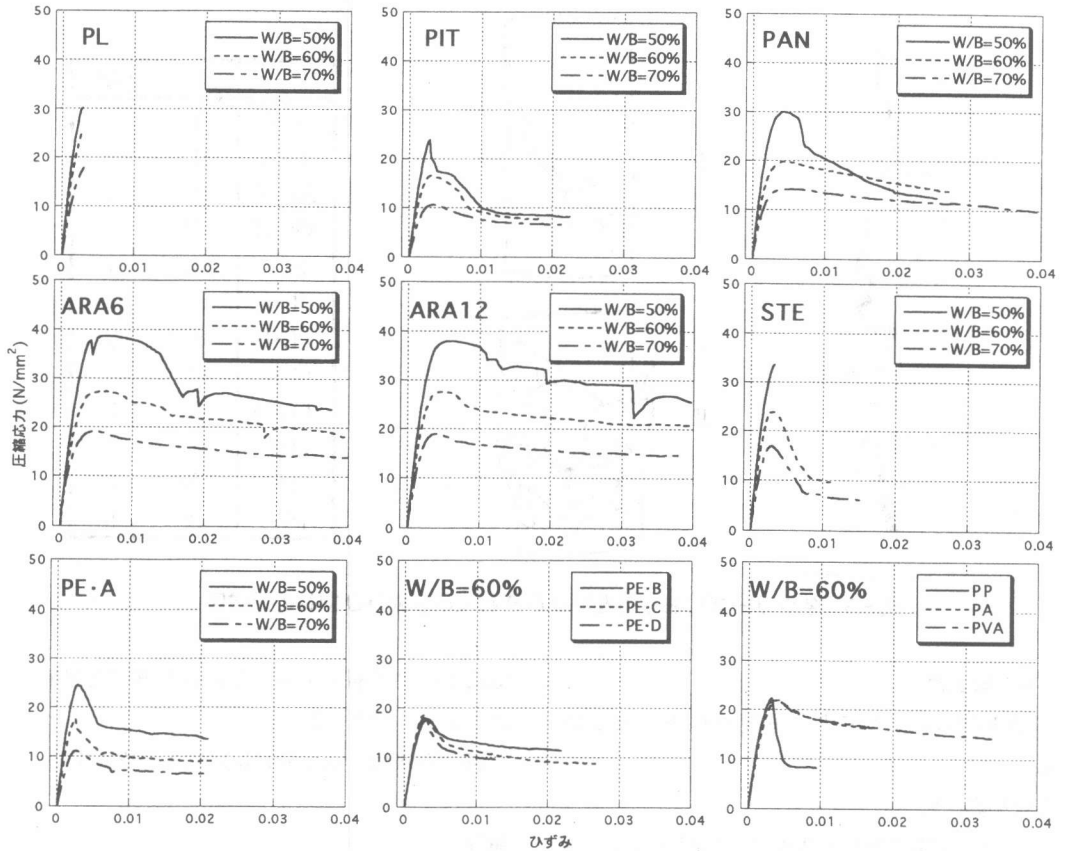


図-2 各シリーズの圧縮載荷試験における圧縮応力-歪み曲線

重の低下が見られた。曲げではひび割れ架橋に優れていたものの、圧縮に対してはひび割れを架橋する特性に極めて劣ることが分かった。

ポリアリレート繊維及びPVA繊維： ピーク以降の挙動は、比較的安定したものであった。

また、ほとんどの繊維で圧縮強度がプレーンよりも大きく低下した理由として、繊維を分散させるために投入した増粘剤の付与により非常に多くの巻き込み空気が混入されたことが、挙げられる。

以上から各シリーズにおける圧縮挙動とひび割れ形状との関係はおおよそ以下のようにまとめられる。圧縮韌性に劣るシリーズ、例えば、PITCH系炭素繊維、スチール繊維及びポリプロピレン繊維のひび割れ性状は、供試体を二つに分断するような斜め亀裂が入るものが多く、一方、圧縮韌性に優れたPAN系炭素繊維、アラミ

ド繊維、ポリアリレート繊維及びPVA繊維などは、供試体中央部でめり込むような状態で、そして亀甲状の亀裂が発生するようなものであった。各シリーズにおけるひび割れ形状の模式図を図-3に示す。

以上の実験結果から曲げ並びに圧縮における挙動とひび割れ形状とがおおよそ対応することが明らかとなった。また、ポリエチレン繊維やポリプロピレン繊維は、圧縮よりも曲げに対する抵抗性能が優れていた。一方、アラミド繊維は、曲げ及び圧縮の双方において韌性に優れた挙動を示した。また、PAN系炭素繊維は、曲げよりも圧縮で韌性に優れた挙動を示した。このように曲げに対する抵抗性能と圧縮に対する抵抗性能は繊維の種類によって大きく異なることが示された。曲げと圧縮における破壊機構の違いについての解明は今後の課題としたい。

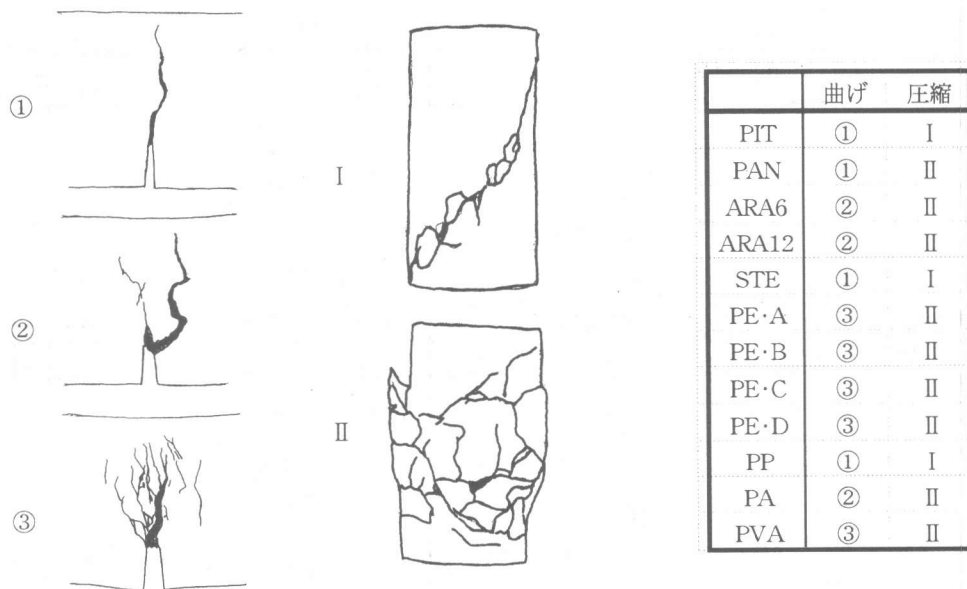


図-3 各シリーズにおける曲げひび割れ及び圧縮ひび割れの模式図

	曲げ	圧縮
PIT	①	I
PAN	①	II
ARA6	②	II
ARA12	②	II
STE	①	I
PE・A	③	II
PE・B	③	II
PE・C	③	II
PE・D	③	II
PP	①	I
PA	②	II
PVA	③	II

#### 4. まとめ

本実験の結果得られた知見を以下にまとめる。

##### 曲げ挙動に関して

- (1)ピーク荷重以降に大きな低下勾配を示した繊維は、PITCH系炭素繊維、PAN系炭素繊維、スチール繊維であった。しかし、両炭素繊維は、比較的高いピーク荷重を示した。
- (2)ピーク荷重付近またはそれ以降にピーク荷重と同程度の荷重を保ちながら変形を示す繊維は、ポリエチレン繊維、PVA繊維であった。
- (3)繊維の長さが長い方が、そして表面処理を施した方が、高いピーク荷重と高いひび割れ抵抗性能を示した。
- (4)水結合材比がピーク荷重や変形性能に与える影響は繊維の種類によって異なる。

##### 圧縮挙動に関して

- (1)圧縮靱性に優れた繊維は、PAN系炭素繊維、アラミド繊維、ポリアリレート繊維及びPVA繊維であった。
- (2)圧縮靱性に劣る繊維はPITCH系炭素繊維、スチール繊維及びポリプロピレン繊維であった。

(3)繊維長さや繊維の表面処理の有無が圧縮挙動に与える影響は小さい。

(4)圧縮強度は、水結合材比に大きく依存する。

#### 謝辞

本研究の一部は建築振興協会、高引張強度・高靱性コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会（委員長：松崎育弘東京理科大学教授）の活動として行ったものである。また、平成8年度文部省科学研究費補助金（研究代表者：東北大学教授 三橋博三，No. 09650616）を得た。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) S. Gracia, A.E. Naaman and J. Pera: Experimental investigation on the potential use of poly(vinyl alcohol) short fibers in fiber-reinforced cement-based composites, *Materials and Structures*, Vol.30, pp.43-52, 1997.
- 2) V.C. Li, D.K. Mishra and H. Wu: Matrix design for pseudo-strain-hardening fiber reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, Vol.28, pp.586-595, 1995.
- 3) V.C. Li and C.K. Leung: Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, *J. Engineering Mechanics*, Vol.118, No.11, pp2246-2264, 1992.