

論文

[1135] 連続繊維補強セメント薄板状部材の力学的特性

正会員○井上孝之（大阪市立大学大学院）

正会員 眞嶋光保（大阪市立大学土木工学科）

1. はじめに

繊維補強セメントによって薄板状部材を作成する場合、繊維混入率を大きくしやすく、補強効率等も考え合わせ、2次元的な補強を目的として連続繊維を使用する方がよいと考えられる。しかしながら連続繊維は配向性を持ち、強度特性への寄与率という点から、繊維の配向、配置と補強効率の関係を調べておくことは重要であると考えられる。そこで本研究では、連続繊維としてフィブリル化（繊維化）したポリプロピレン繊維（以下PPfとする）を用いた薄板状部材に対して直接引張荷試験を行ない、補強効率に影響を及ぼすと考えられる繊維混入量、繊維配置形態およびその角度に着目し、これらが応力-ひずみ関係、部材強度、ひびわれ性状などに及ぼす影響を比較検討することにより、ポリプロピレン繊維補強セメント板の基本的力学性状を明らかにすることを目的としている。またポリプロピレン（PP）、ポリエチレン（PE）、ビニロン（PVA）の各メッシュ状繊維（図-1）によって補強されたものに対しても試験を行ない比較考察する。

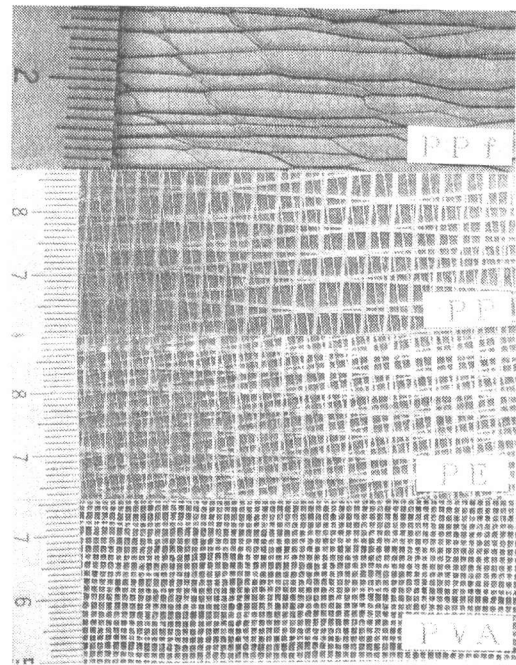
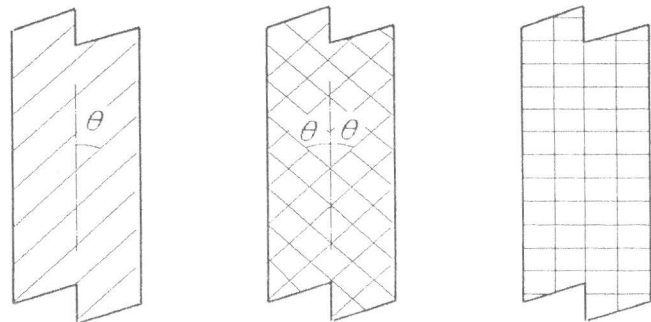


図-1 使用した補強用繊維

2. 実験概要

PPf 供試体は図-2に示すように3種類の繊維配置形態とし、縦方向補強供試体については供試体中に含まれる全繊維量を変化させ、また他の補強形態については供試体中に含まれる全繊維量は一定となるよう、繊維シート枚数を60枚として、繊維軸方向と荷重作用方向のなす角度（以下繊維角度とする）を変化させたものを作製した。供試体



S : 一方向補強  
供試体

D : 対称二方向  
補強供試体

O : 直角補強  
供試体

図-2 繊維の配置形態

中の実際の繊維量は、試験後の測定により、繊維量を一定としたものについては若干のばらつきはあるものの、およそ8%vol.であることを確認した。PPf以外の繊維については、繊維シートの坪量、素材の比重が異なるため、供試体中における繊維の体積比が一定となるように混入シート枚数を決定した。

供試体FRCの作製は、繊維ネットワーク中にセメントマトリックスを手で圧入し、厚さ6mmとなるようにシート状に作製した。マトリックスの配合は表-1のようである。引張試験供試体は、長さ300mm、幅25mmとなるようにシートから切り取って作製した。養生は20℃水中で28日間、引張試験を行なうまでとした。

直接引張载荷試験は、载荷速度を10mm/minとしてインストロン型試験機で行ない、試験機のクロスヘッド間の変位を記録するチャート以外にクリップオンタイプの変位計により変位と荷重を動ひずみ計により連続的に、供試体が破壊に至るまで測定した。

表-1 配合表\*

セメント	1.00
砂(珪砂)	0.19
水	0.34
フライッシュ	0.25
混和剤**	0.018

\* 数値は重量比である  
\*\* 高性能流動化剤

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 繊維量の異なる供試体

(使用繊維: PPf)

直接引張試験における繊維量と初期弾性係数の関係を図-3に示す。これをみると、繊維を混入しないマトリックス単体ではデータのばらつきが大きい、繊維を混入すると初期弾性係数は若干低下するようである。また、繊維量が増加した場合、繊維量と初期弾性係数の関係は明白なものではなく、一定あるいはわずかに増加傾向がみられる程度である。今回のようにマトリックスに比べ小さい弾性係数を持つ繊維で補強する場合、複合材の弾性係数はその繊維量に比例して小さくなるとする繊維補強における複合則とは異なる結果である。

図-4に繊維量とひびわれ発生応力の関係を示す。繊維が混入されることによってひびわれ発生応力はマトリックス強度よりも低下するが、繊維量が増加するとひびわれ発生応力は増加することがわかる。以上に示した2つの実験結果からは、繊維が混入された場合とそうでない場合には、マトリックスの配合が同じで繊維量が0%から1%、2%と増加しても、工学的な特性値は連続的なものではなく、異なる挙動を示すことがわかる。繊維量と初期ひびわれ時のひずみの関係を図-5に示す。この図においてもその関係は連続的なものではない。図中の直線線はこれを考慮しVf = 0%のデ

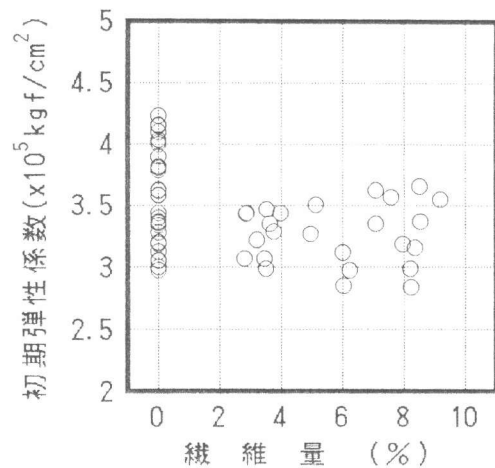


図-3 繊維量と初期弾性係数の関係

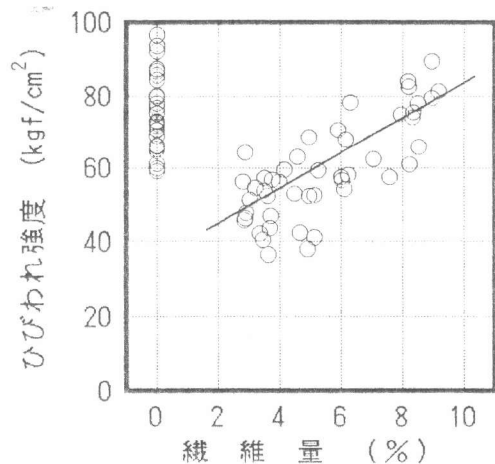


図-4 繊維量とひびわれ強度の関係

ータを除いて直線回帰したものである。これらの結果も複合則とは矛盾する結果であり、複合則におけるいくつかの仮定にとらわれない何らかのモデルの検討が必要であると考えられる。

繊維量を変化させた各供試体の応力-ひずみ曲線を図-6に示す。複合材の応力-ひずみ曲線は、ひびわれ発生までの繊維とマトリックスが一体となって荷重を受け持つ領域、応力がほぼ一定でひずみのみが増加するひびわれ多発域およびひびわれ発生完了後の繊維のみで荷重を受け持つ繊維依存域の3つに大別できる。繊維量が減少するにしたがって繊維依存域における曲線の傾きが小さく、ひびわれ多発域におけるひずみが大きく、またこの領域での応力の振幅が大きくなっていることがわかる。

### 3. 2 繊維配置および繊維角度の異なる

供試体 (使用繊維: P P f)

図-7に1方向および対称2方向補強供試体の初期弾性係数を示す。これをみると、どちらの補強形態においても繊維角度が増加するにつれて初期弾性係数は小さくなるが、全角度において1方向補強の方が低い値をとっている。なお、これらの値は両補強のいずれの角度においてもマトリックスのそれを下回っている。このような傾向は図-8に示すように、ひびわれ発生応力についてもみられる。複合則では、マトリックスと繊維の付着が完全であるという仮定のもとで、両者の体積比により決まるとされる初期弾性係数およびひびわれ発生応力は、繊維の補強形態および繊維角度にも影響を受けることがわかる。

1方向補強で繊維が角度を持つ場合には、ひびわれが分散することなく1カ所に集中したため、適切な応力-ひずみ曲線は得ることができなかった。この場合の供試体の破壊は、繊維の破断ではなく繊維-マトリックス間に作用するせん断力による付着切れ破壊となっていた。対称2方向補強の場合の各繊維角度における応力-ひずみを図-9に示す。これらの供試体においては混入されている繊維量が一定であるにもかかわらず、繊維角度が大きくなるにしたがい、1方向補強における繊維量の減少による変化と同様の挙動を示したことから、繊維角度の増加は実質繊維量の減少であるといえる。

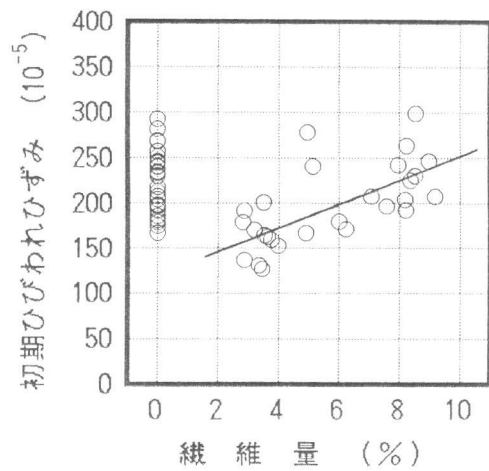


図-5 繊維量と初期ひびわれ時のひずみの関係

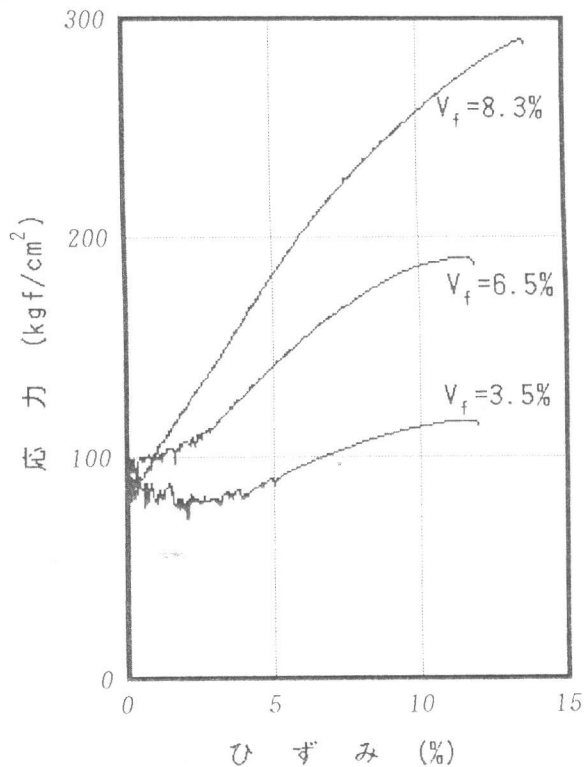


図-6 繊維量を変化させた場合の応力-ひずみ曲線

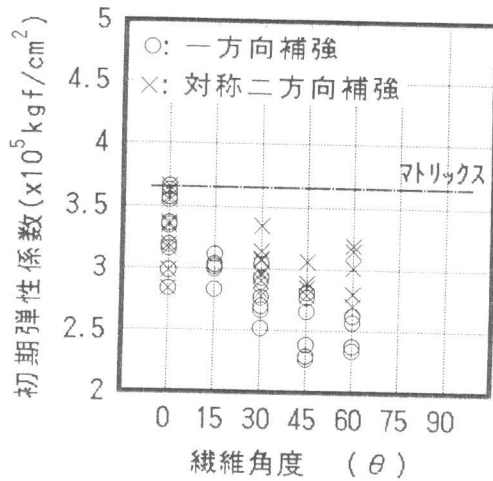


図-7 繊維角度と初期弾性係数の関係

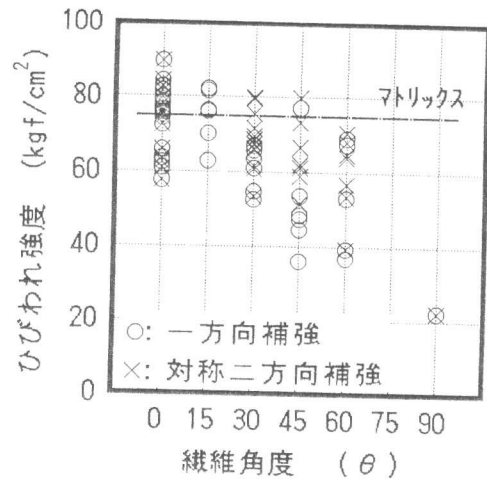


図-8 繊維角度とひびわれ強度の関係

### 3. 3 繊維種類および形状の異なる供試体

メッシュ状繊維では直角な2方向に等量の繊維が配置されているので、PPfについても同様の配置形態とした供試体を作成し、これらの力学的性状を比較した。ひびわれ発生応力についてはいずれの場合もマトリックス強度を下回っていたが、その値には大差がなかった。引張強度については大きな違いがみられた。複合材の引張強度は最終的には繊維の強度と体積比に支配されるとするACK理論<sup>1)</sup>から求められる破断強度はPVAを除いてほぼ等しいものであったが、結果は図-10 のようになった。また各繊維による供試体の応力-ひずみ曲線を図-11 に示す。PE供試体についてはその変位が余りにも大きく本実験において準備したクリップ式ひずみ計ではこれを測定しきれなかったが、クロスヘッド変位から計算するとその破断ひずみはおよそ35%であった。これをみると繊維によって大きくその形状が異なることがわかる。繊維形状の違いということでPPとPPfを比べると、ひびわれ多発域の長さとその違いが大きくみられる。これは繊維-マトリックス間の付着性能の違いにより生じていると考えられる。PPにおいてはACK理論により求まる繊維の付加ひずみ(=ひびわれ多発域の長さ)に加えて、付着はがれによってマトリックスからの拘束を解放された部分の繊維にも伸び変形が生じた結果、ひびわれ多発域におけるひずみが大きくなったと考えられる。このことから繊維の付着性状が複合材の引張性状に与える影響は大きいことがわかる。PVAを用いた供試体においてもひびわ

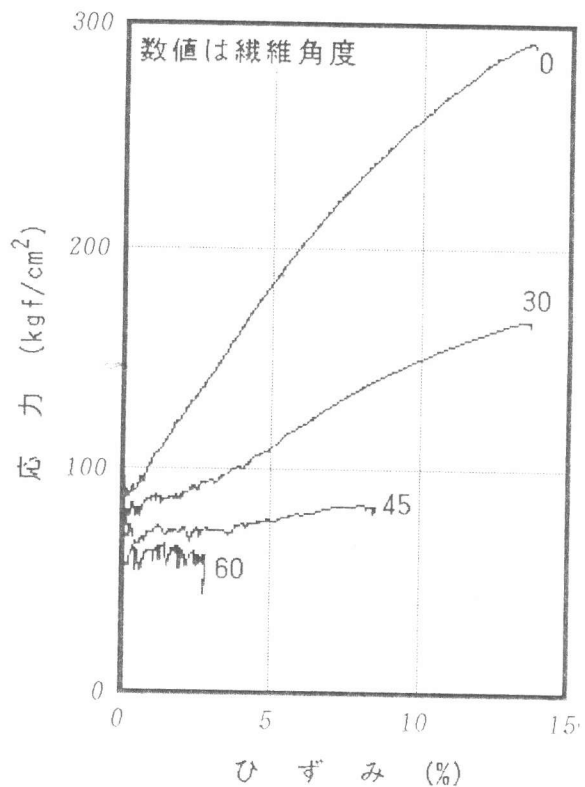


図-9 対称2方向補強供試体の各繊維角度における応力-ひずみ曲線

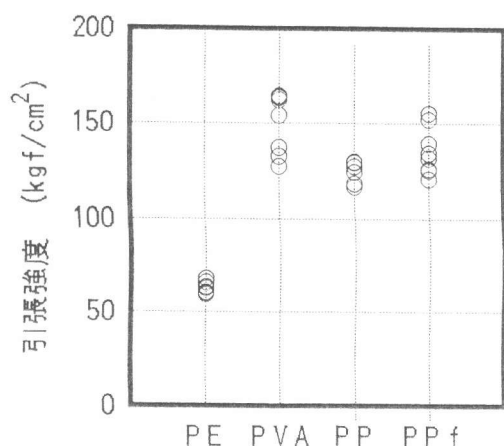


図-10 各繊維による供試体の引張強度

れ多発域が長くなったが、これは他の繊維に比べて繊維が太かったために、ACK理論によるひびわれ分散機構によって発生するひびわれに加えて、かぶりが少ないために生じたマトリックスの剥離にともなうひびわれが発生したためと考えられる。PEを使用した供試体は非常に伸び性能が良かった。これは繊維特有の性状であることも考えられるが、この供試体では繊維の付着性状が悪く、ひびわれ発生にともなってマトリックスのはがれが多数発生した。

このため拘束を解放された繊維の伸びが加わって、大変形となったことが考えられる。PPfの供試体においてはこのようなマトリックスのはがれが全く観察されなかった。その繊維形状による繊維自身の付着性能が良かったことがその要因として挙げられるが、繊維が他に比べて細かったことも要因の一つであろう。

今回の実験においては、その引張载荷中に目視による供試体表面の観察（主としてひびわれ本数のカウント）を行なった。その結果、補強形態や繊維角度によってその程度

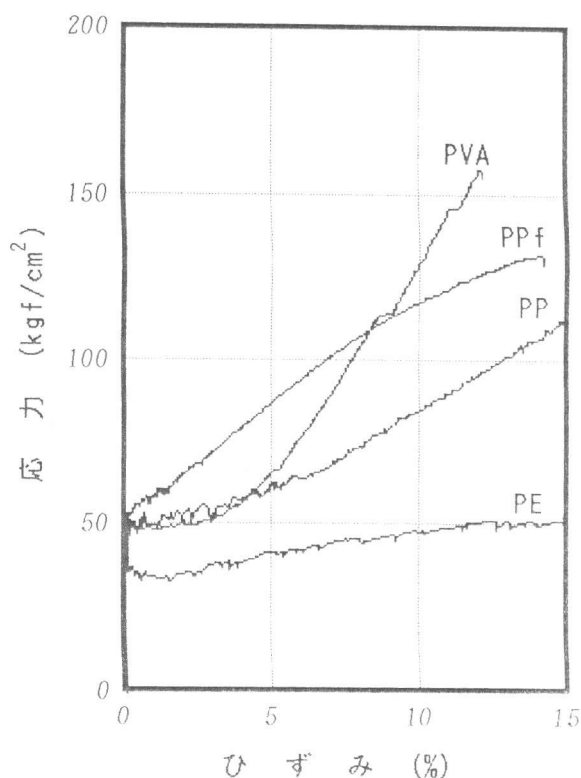


図-11 各繊維による補強供試体の応力-ひずみ曲線

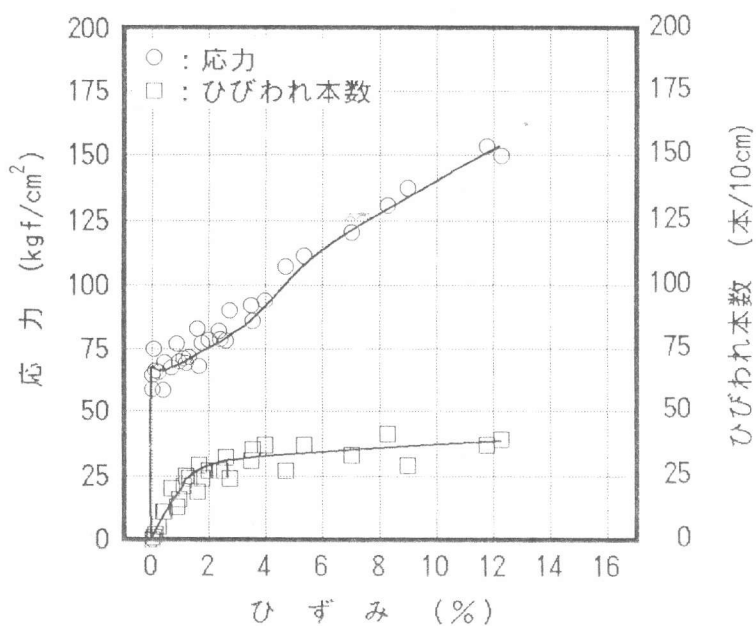


図-12 PPf供試体における応力-ひずみ関係とひびわれ本数-ひずみの関係

の差はあるがおよそその応力-ひずみ関係に関連するある一様な関係がみられた。図-12 は P P f 供試体における応力-ひずみ曲線とそれに対応する供試体 10 cm あたり、すなわちひずみ計測区間内において確認されたひびわれ発生本数を表すものである。これは 5 つの供試体における結果を重ね書きしたものであるので、およそ平均的な応力-ひずみおよび発生ひびわれ本数-ひずみの関係を示すものであると考えられる。これをみてわかることは、ひびわれ本数の増加はひびわれ多発域内でほとんど終了するが、それまでの増加傾向は直線的なものではなく、上に凸な曲線となっている。あるひびわれ部において、そのひびわれが発生してから次のひびわれが発生するまでの間の変位にともなう繊維の付加ひずみが次に発生するひびわれ部に分散されると考えれば、ひびわれ数が増加するにつれてそのひびわれ幅は大きくなるので、ひびわれ本数-ひずみの関係が説明される。この時の付加ひずみは実質繊維量に依存するものと考えられる。

#### 4. まとめ

以上の内容をまとめると次のようになる。

- 1) 複合材の初期弾性係数、ひびわれ強度およびひびわれ発生時のひずみと繊維量の関係はいずれも、繊維が混入された場合とそうでない場合には繊維量が増加しても連続的には対応せず、別の挙動を示す。これらの結果は複合則によるものとは異なり、何らかのモデルの検討が必要である。
- 2) 複合材における初期弾性係数およびひびわれ発生応力は、マトリックスと繊維の体積比によってによって決まるものではなく、繊維の配置形態およびその角度も複合材の工学的特性値に影響を及ぼす。繊維角度の増加は実質繊維量の減少であるといえる。
- 3) 複合材の引張性状に与える繊維の付着性能の影響は大きく、メッシュ状繊維による機械的付着はよいと考えられるが、繊維の体積比を変えずにより大きな補強効果を得るためには、繊維は細い方がよいことが推測される。

#### 【参考文献】

- 1) J. Aveston, G. A. Cooper & A. Kelly: "Single and Multiple Fracture", Conf. Proc. of the NPL, The Properties of Fibre Composites, 1971, pp15-24