

[1120] 3次元織物補強コンクリート部材の力学的特性

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)
 正会員 ○中川 裕章 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

近年、骨材の品質の悪化などから鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が問題となり、特に臨海地方では、海塩粒子による塩化物により鉄筋の腐食が激しく、早急な対応が必要となっている。また、RC構造物の施工合理化に伴い、部材の大型化及びプレファブ化が進み、より軽量でかつ高強度な部材への需要が高まってきている。このような背景から、耐久性に優れた軽量・高強度材料である繊維補強コンクリート (FRC) の適用化研究が盛んに行なわれるようになり、現在では、種々の繊維あるいは繊維複合形態によるFRCが開発されている。

3次元織物補強コンクリート (Three-Dimensional Fabric Reinforced Concrete; 3D-FRC) は、コンクリートの補強材に従来の鉄筋に代わり3次元織物を用いた新しい複合材料であり、FRCの中でも最も理想的な繊維複合形態を有している。

3D-FRCに使用する3次元織物は、各種繊維 (PAN系炭素繊維, アラミド繊維, etc.) のロービングを3軸方向に織り上げた立体状の織物¹⁾である。3次元織物の概念図を図-1に、各種断面の3次元織物を写真-1に示す。3D-FRCは、この3次元織物のロービングに樹脂を含浸させて形状保持性をもたせた多孔複合構造体を作り、内部にセメント系マトリックスを充填したものであり、ロービングの繊維種類、フィラメント数及びピッチを変えることによって、部材の応力状態に適した繊維補強が可能である。また、繊維が格子状に組織されているため、マトリックスとの機械的な付着力も大きいと考えられ、さらに、3次元織物はロービングの樹脂含浸まで工場機械生産されるため、生産性にも優れている。

本研究は、3D-FRCを実際の建設物に適用していくために、各種の材料特性を把握することを目的に、マトリックス種類及び繊維種類、繊維量などを変化させた3D-FRC部材について各種強度試験を行なったものである。

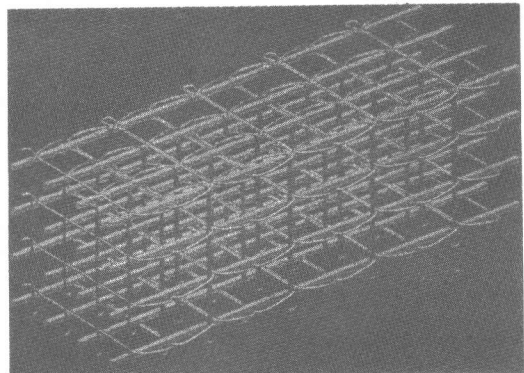


図-1 3次元織物概念図

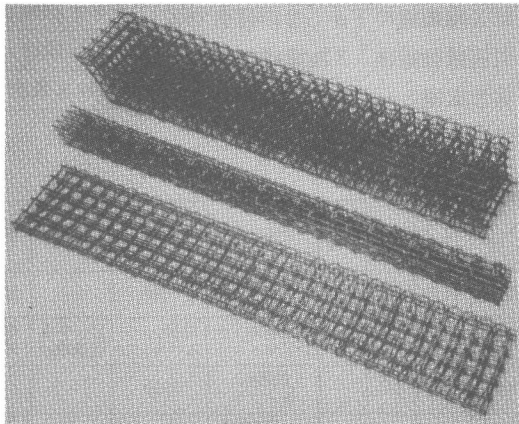


写真-1 各種断面の3次元織物

2. 3D-FRCの力学的特性

2.1 実験概要

3D-FRC部材の力学的特性を把握するために、以下の2段階に分けて強度試験を実施した。

Phase I：繊維種類及びマトリックス種類が3D-FRC梁の曲げ特性に及ぼす影響について検討する。

Phase II：繊維量及びX方向の繊維ピッチが3D-FRCの曲げ特性及び圧縮耐力・せん断耐力に及ぼす影響について検討する。

(1) 使用材料

実験に使用した3次元織物の諸元を表-1に、各繊維の物理的性質を表-2に示す。Phase Iでは、PAN系炭素繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維、ステンレス繊維の4種類について、繊維混入率が体積比で1.0~1.3%になるように織り上げた。Phase IIでは、PAN系炭素繊維及びアラミド繊維についてPhase IのX軸繊維量の1,1.5,2倍の3水準に、X方向の繊維ピッチを40mm及び80mmの2水準に設定した。なお、繊維量の目安として、曲げ及び曲げせん断試験の場合はX軸繊維の下から2段目までを引張補強繊維、Z軸繊維をせん断補強繊維として、圧縮試験の場合は全X軸繊維を圧縮補強繊維と

表-1 3次元織物諸元

Phase	No.	繊維種類	フィラメント数 (F)		ピッチ (mm)		Pt (%)	Pw (%)	Pc (%)
			X軸繊維	YZ軸繊維	X方向	YZ方向			
I	C	PAN-CF	36,000	36,000	40	12.5	0.30	0.23	0.63
	A	アラミド	10,000	10,000			0.26	0.20	0.54
	V	ビニロン	10,000	10,000			0.34	0.26	0.71
	S	ステンレス	10,500	21,000	80	0.25	0.20	0.53	
II	C0	PAN-CF	36,000	36,000	40	12.5	0.30	0.23	0.63
	C1				80		0.12		
	C2		40		0.45		0.23		
	C3		80		0.12		0.94		
	C4		40		0.60		0.23		
	C5	80	0.12	1.25					
	A0	アラミド	10,000	10,000	40		0.26	0.20	0.54
	A1				80		0.10		
	A2		40		0.39		0.20		
	A3		80		0.10		0.81		
	A4		40		0.52		0.20		
A5	80	0.10	1.08						

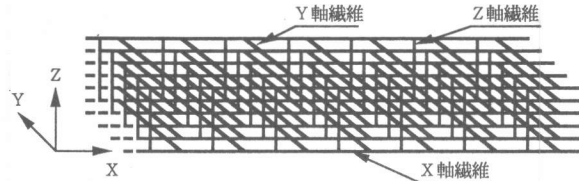


表-2 繊維の物理的性質

繊維種類	直径 (μm)	比重	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸度 (%)
PAN系炭素繊維	7.0	1.90	320	2.3×10 ⁴	1.3
アラミド繊維	12.4	1.39	310	7.5×10 ³	4.2
ビニロン繊維	14.2	1.30	150	3.7×10 ³	5.0~6.0
ステンレス繊維	12.0	7.90	150~250	1.9×10 ⁴	1.0~2.0

表-3 マトリックスの配合, 特性, 養生条件

	W/C (%)	S/C	Vf (%)	セメント	骨材	繊維	混和剤	特性値 (材令4週)			養生条件
								比重	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	
配合1	45.0	2.2	-	早強ポルトランドセメント	川砂	-	減水剤	2.2	514	3.5×10 ⁵	20℃水中
配合2	73.7	0.4	2.3	早強ポルトランドセメント	珪砂, シラスパルーン	ピッチ系炭素繊維	増粘剤 消泡剤	1.6	278	1.1×10 ⁵	20℃水中
配合3	20.0	1.0	-	超緻密セメント	珪砂	-	-	2.4	1251	4.1×10 ⁵	60℃蒸気養生後 20℃水中
配合4	32.5	0.7	-	低吸収セメント	珪砂	-	減水剤	2.1	674	2.4×10 ⁵	40℃蒸気養生後 20℃・60%RH室内

して、それぞれPt（引張補強繊維比）、Pw（せん断補強繊維比）、Pc（圧縮補強繊維比）を計算した。また、3次元織物のロービングに含浸した樹脂はエポキシ樹脂である。

3次元織物に充填したマトリックスの配合・特性・養生条件を表-3に示す。配合1は早強ポルトランドセメントを使用した川砂モルタル、配合2は珪砂モルタルにピッチ系炭素繊維を混入したCFRC、配合3は超微粒子を含む超緻密セメントを使用した超高強度珪砂モルタル、配合4は高アルミナ低石灰型の低収縮セメントを使用した珪砂モルタルである。なお、Phase IIでは配合4を使用した。

(2) 試験方法

供試体の形状及び寸法を図-2に示す。載荷は、100tonオートグラフ試験機を用い、3等分点載荷曲げ試験についてはクロスヘッドスピード1.0mm/min、圧縮試験及び曲げせん断試験については0.5mm/minで載荷し、荷重～たわみ（供試体スパン中央位置）曲線を記録した。また、Phase IIでは、3等分点載荷曲げ供試体のスパン中央位置のマトリックス表面及び3次元織物の4隅のX軸繊維中央部にストレージを貼り、載荷時にマトリックス表面及び3次元織物に生ずるひずみを測定した。なお、試験はすべて材料4週で実施した。

2.2 実験結果

(1) Phase I

3等分点載荷曲げ試験による荷重～たわみ曲線を図-3に、供試体の最終破壊状況を写真-2に示す。

破壊性状は、アラミド繊維を使用した供試体

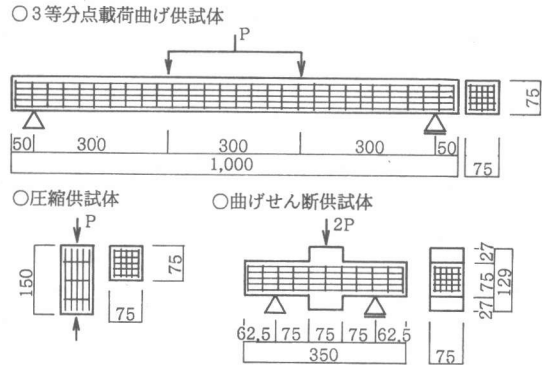


図-2 供試体の形状・寸法

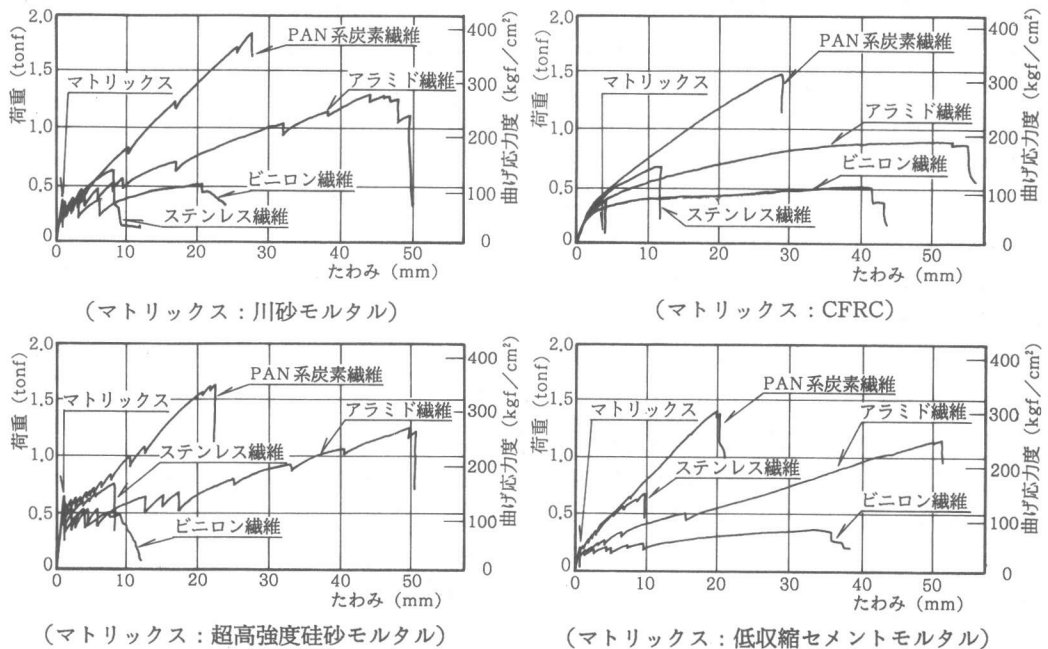
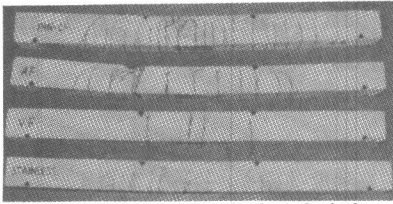
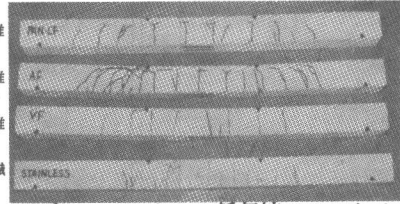


図-3 荷重～たわみ曲線 (Phase I)



(マトリックス：超高強度珪砂モルタル)



(マトリックス：低収縮セメントモルタル)

写真-2 供試体の最終破壊状況

を除いて、引張側繊維の破断による曲げ破壊であったが、アラミド繊維を使用した供試体は、載荷初期においては曲げひびわれが先行するが、荷重が大きくなるに従い斜めひびわれが生じ、最終的にはマトリックスの圧壊により耐力を失った。また、ビニロン繊維を使用した供試体は、PAN系炭素繊維及びアラミド繊維を使用した供試体に比べてひびわれの本数が少なく、高強度マトリックスほどこの傾向は強くなった。

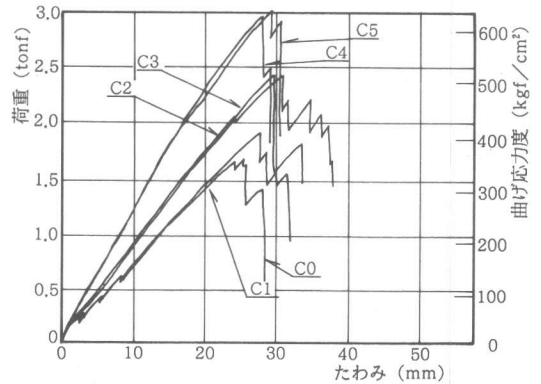
荷重～たわみ関係は、概ね初期ひびわれまではマトリックス、初期ひびわれ以後は繊維の性質によって支配され、初期ひびわれ荷重及び初期ひびわれまでの剛性は、マトリックスの強度及び弾性係数が大きくなるに従い増大し、最大荷重、最大たわみ及び初期ひびわれ以後の剛性は、繊維の引張強度、伸度及び弾性係数が大きくなるに従い増大した。ただし、ビニロン繊維を使用した供試体の最大たわみは、繊維伸度が大きいにもかかわらず全体に小さく、高強度マトリックスほどこの傾向は強くなった。

また、CFRCを使用した供試体は、最大荷重までなめらかな曲線を描いており、ひびわれの分散が良好であったことがうかがわれる。他のマトリックスを使用した供試体は、ほぼBi-linearな荷重～たわみ曲線となり、ひびわれが入るとともに一時的な荷重低下が生じている。超高強度珪砂モルタルを使用した供試体は、初期ひびわれ以後にみかけ上の降伏域が生じているが、これは、マトリックス自体の初期ひびわれ強度が大きいことが影響しているものと思われる。また、低収縮セメントモルタルを使用した供試体は初期ひびわれ強度が低く、マトリックス配合及び養生条件の影響により、試験以前に既に微細な収縮ひびわれが生じていたものと思われる。

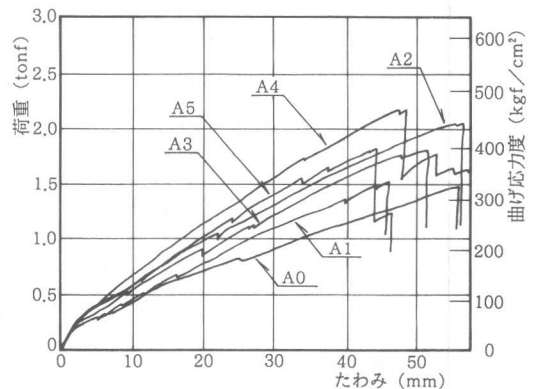
(2) Phase II (3等分点載荷曲げ試験結果)

3等分点載荷曲げ試験による荷重～たわみ曲線を図-4に、供試体の最終破壊状況を写真-2に示す。

破壊性状は、載荷初期においては曲げひびわれが先行するが、荷重が大きくなるに従い斜めひびわれが生じ、最終的には、PAN系炭素繊維

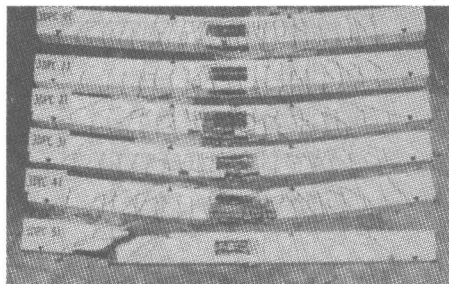


(繊維：PAN系炭素繊維)

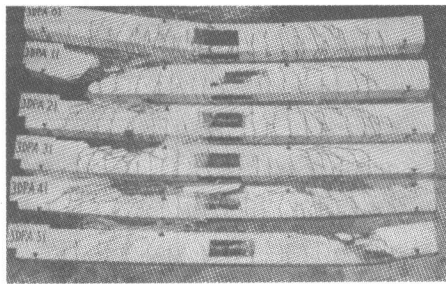


(繊維：アラミド繊維)

図-4 荷重～たわみ曲線 (Phase II)



C0
C1
C2
C3
C4
C5



A0
A1
A2
A3
A4
A5

写真-3 供試体の最終破壊状況 (Phase II)

維を使用した供試体は、C5を除いて引張側繊維の破断に伴う曲げ破壊により、アラミド繊維を使用した供試体は、A0は曲げ破壊により、A2～A4はマトリックスの圧壊により耐力が低下した。また、Ptの増大とともに斜めひびわれの数が増加する傾向がみられ、さらに、Pwが少ないC5およびA1,A5は、斜張力破壊により急激に耐力を失った。

荷重～たわみ関係は、PAN系炭素繊維を使用した供試体は、Ptが等しいものはほぼ同等な剛性及び最大荷重を示しているが、アラミド繊維を使用した供試体は、Pt=0.26%を除いて、Ptが等しいものでもPwが減少すると剛性、最大荷重及び最大たわみが低下している。最大荷重とPtの関係を図-5に示す。同図によると、最大荷重は、PAN系炭素繊維を使用した供試体はPtにほぼ比例して増大し、Pwの影響はほとんどみられないが、アラミド繊維を使用した供試体は、Ptの増大に伴ってPwの影響が大きく現われる結果となった。

荷重～ひずみ度曲線の代表例を図-6に示す。同図によると、初期ひびわれ発生以前は弾性体に近い荷重～ひずみ関係を示し、中立軸もほぼ中央にあるが、ひびわれ発生以後は引張側繊維のひずみの急激な増大により中立軸が圧縮側に移行し、最大荷重時にはほぼ3次元織物の圧縮側繊維の位置にまで達している。また、最大荷重時におけるPAN系炭素繊維の引張ひずみ度は、繊維の破断伸度(1.3%)とほぼ等しい値であるのに対し、アラミド繊維の引張ひずみ度は、繊維の破断伸度(4.2%)をかなり下回

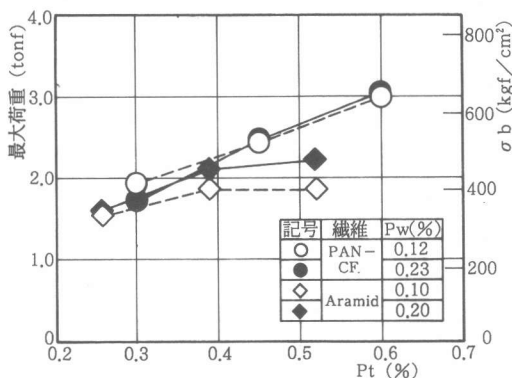


図-5 最大荷重とPtの関係

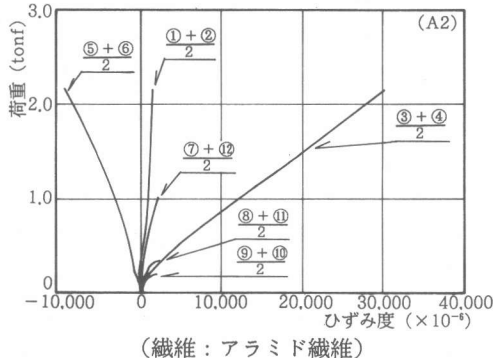
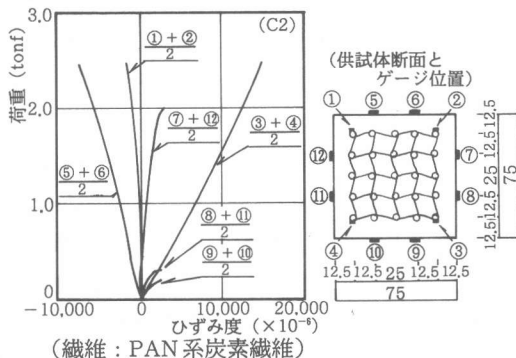


図-6 荷重～ひずみ度曲線

ており、繊維の破断以前にせん断破壊あるいは圧壊が生じたことを示している。

(3) Phase II (圧縮・曲げせん断試験結果)

圧縮耐力とPcの関係を図-7に、せん断耐力とPtとの関係を図-8にそれぞれ示す。

圧縮耐力は、PAN系炭素繊維を使用した供試体は、マトリックス

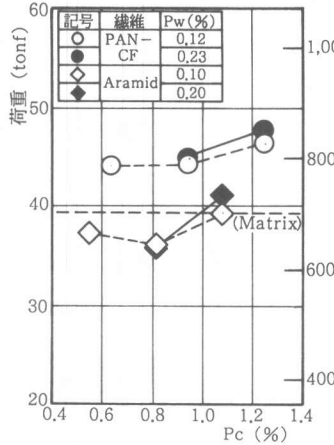


図-7 圧縮耐力とPcの関係

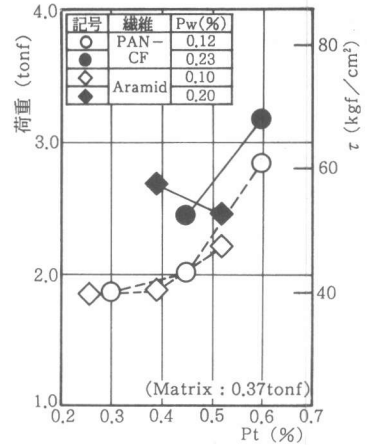


図-8 せん断耐力とPtの関係

自体の圧縮耐力よりも大きく、さらに、Pc及びPwの増大により圧縮耐力は向上している。また、アラミド繊維を使用した供試体は、Pc=0.81~1.08%ではPc及びPwの増大により圧縮耐力は向上しているものの、Pc=0.54~0.81%ではマトリックス自体の圧縮耐力よりも低い結果となった。

せん断耐力は、PAN系炭素繊維を使用した供試体は、Pt=0.30~0.45%ではPtの増大によるせん断耐力の向上はわずかであるが、Pt=0.45~0.60%ではPtの増大によりせん断耐力は大幅に向上した。アラミド繊維を使用した供試体は、Pw=0.10%の場合はPAN系炭素繊維と同様な傾向を示し、Pt=0.26~0.39%ではPtの増大によるせん断耐力の向上はわずかであるが、Pt=0.39~0.52%ではPtの増大によりせん断耐力は向上した。しかし、Pw=0.20%の場合はPtの増大により逆にせん断耐力は低下しており、この結果については今後の検討課題としたい。また、両繊維を使用した供試体共に、Pwの増大によりせん断耐力は向上した。

3. まとめ

今回の3D-FRC部材の力学的特性に関する実験の結果より、以下に示す知見が得られた。

- a. 3D-FRC梁の3等分点載荷曲げ試験の結果、初期ひびわれまでの曲げ性状は主にマトリックスの性質に支配され、初期ひびわれ以後は繊維の性質により支配される。
- b. 今回の実験では、3D-FRC梁の曲げ破壊性状は繊維種類により異り、PAN系炭素繊維を使用した3D-FRC梁は引張側繊維の破断により、アラミド繊維を使用した3D-FRC梁はマトリックスの圧壊により最大耐力に至る場合が多かった。また、Ptに比較してPwが小さい3D-FRC梁は、斜張力破壊により急激な耐力の低下を生ずる場合がある。
- c. PAN系炭素繊維及びアラミド繊維を使用した3D-FRCの圧縮耐力は、Pcが比較的大きい(Pc=1.0%程度)場合は、Pcの増大により向上する。また、PAN系炭素繊維はマトリックスの圧縮耐力の向上に有効である。
- d. PAN系炭素繊維及びアラミド繊維を使用した3D-FRCのせん断耐力は、Ptが比較的大きい(Pt=0.5%程度)場合は、Ptの増大により向上する。また、両繊維ともPwの増大によりせん断耐力は向上する。

なお、今回の実験に関し、鹿島建設技術研究所小林美亀雄主管研究員及び渡辺茂雄研究員の御指導・御協力を得た。深謝の意を表します。

参考文献 1) 福多健二：柔構造複合材料、高分子 28巻 10月号、1979、pp706~709